

**Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe
Gartenbauzentrum Westfalen-Lippe, Wolbeck**

**Erstellung eines Simulationsmodells für ein zu
optimierendes Hydrokultursystem für die Gerbera-
Schnittblumenkultur unter Berücksichtigung äußerer
Einflussgrößen auf Leistungsparameter der Pflanze**

DISSERTATION

**zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum horticulrarum
(Dr. rer. hort.)**

**eingereicht an der
Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät
der Humboldt-Universität zu Berlin**

von
Diplom-Ingenieur Gartenbau (FH)
MSc in Technology of Crop Protection
Markus Richter
geb. am 17.11.1964 in Coesfeld

Dekan der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät
Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Ernst Lindemann

1. Gutachter: Prof. Dr. sc. agr. Hans-Günther Kaufmann
2. Gutachter: Prof. Dr. habil. Jürgen Matschke
3. Gutachterin: Doz. Dr. sc. agr. Christel Richter

Tag der Einreichung: 02.10.2000

Tag der mündlichen Prüfung: 06.06.2001

Abstrakt (deutsch)

Ein computergestütztes Simulationsmodell für die Schnittblumen-Steinwollkultur der *Gerbera jamesonii* (H. Bolus ex Hook.) wurde am Beispiel der Sorte 'Moana' erstellt. Aufbauend auf Messdaten morphologischer und physiologischer Parameter an Versuchspflanzen ließ sich das Wachstum von Blättern, Wurzeln und Blumen modellieren. Unter Berücksichtigung äußerer Einflussgrößen konnte mit dem Modell die Entwicklung eines Gerberabestandes hinsichtlich des Wachstums der Blätter, Blumen und Wurzeln einschließlich der wichtigsten Ertragskomponente, dem kumulativen Blümenertrag, in Abhängigkeit von physiologischen Leistungskriterien wie Atmung, Kohlendioxid- und Stickstoffaufnahme simuliert werden.

Die Auswertungen des zeitlichen und räumlichen Wachstums der Gerbera der Sorte 'Moana' zeigten, dass die Blattverteilung unter Berücksichtigung des Alters Einfluss auf die Photosyntheseleistung des Bestandes nahm. Ebenso wurde eine Abhängigkeit der Blütenentwicklung von der Blattbildung nachgewiesen. Diese Ergebnisse waren die Basis für die Entwicklung der Modellstruktur.

Teile von in der Literatur beschriebenen Modellen konnten erfolgreich in eine übergeordnete Modellstruktur eingebunden werden. Für den Wechsel zwischen vegetativem und generativem Wachstum unter Berücksichtigung der Blattalterung wurden für die Gerbera spezifische Modellfunktionen entwickelt. Bislang nicht verfügbare Gleichungssysteme zur Definition des Einflusses der Umweltparameter auf die Kohlendioxid- und Stickstoffaufnahme waren das Ergebnis von Gaswechsel- und Stickstoffaufnahmeanalysen.

Die mit dem Modell berechneten Wachstumswerte für die Blattentwicklung und den Blümenertrag stimmten bei Verwendung gleicher Umweltbedingungen mit denen einer Gewächshauskultur überein. Des weiteren erwies sich das Modell für die Analyse der Auswirkungen eines simulierten Blattbrechvorgangs mit seinen Prognosen als geeignet. Die Verwendung des Modells zur Bestimmung optimaler Klima- und Wachstumsparameter für die Kultur der Sorte 'Moana' führte zu Werten, die bei konstanter Einhaltung eine 60 prozentige Ertragssteigerung gegenüber anfänglich eingesetzten Parametern bedingten.

Für den Praktiker stellt das Modell ein Hilfsmittel dar, in einer Gerberakultur mit der Sorte 'Moana' die Sollwerte der Klimaführung bei gegebenen nicht beeinflussbaren Kulturbedingungen zu optimieren, um größtmögliche Erträge zu erzielen. Dem Versuchsansteller in Forschungseinrichtungen wird damit ein Rüstzeug gegeben, klima- und kulturtechnische Einflussgrößen und deren Kombinationen vorab mit dem Modell zu überprüfen, Extremwerte zu identifizieren und somit sinnvolle Versuchsparameter in Abhängigkeit des Versuchszieles zu definieren.

Schlagworte

Gerbera jamesonii
Wachstumsmodell
Ertragsmaximierung
Klimabedingungen
Kulturführung

Abstract (englisch)

A computer based crop simulation model for a cut flower rockwool cultivation of *Gerbera jamesonii* (H. Bolus ex Hook.) has been developed for the cultivar 'Moana'. Basing on measurements of morphological and physiological parameters at experimental plants growth of leaves, roots and flowers has been modelled. In consideration of different physical environmental conditions the model was able to simulate the development of a Gerbera crop concerning growth of leaves, flowers and roots including the most important yield component the cumulative flower yield in dependence on physiological efficiency parameters like respiration, carbon dioxide and nitrogen assimilation.

The evaluation of time and space dependent growth of Gerberas of the cultivar 'Moana' showed the influence of leaf distribution with regard to leaf age on the photosynthetic efficiency of the crop. Furthermore there was evidence of a dependency of flower growth on leaf development. On the the basis of these results the model structure has been worked out.

Elements of already in the relevant literature described models were successfully incorporated into the superior model structure. To switch between vegetative and generative growth with regard to leaf aging a special submodel has been developed for the Gerbera crop. Till now not available mathematical functions to define the influence of the environmental conditions on carbon dioxide and nitrogen assimilation resulted form gas exchange and nitrogen uptake analysis.

Growth data for leaf development and flower yield calculated by the model corresponded to the observed data when the same values for the environmental parameters have been used. Furthermore the model was able by means of its predictions to analyse the effects of simulated leaf picking. The use of the model to calculate optimized climatic and growth parameters for a cultivation of the cultivar 'Moana' led to values that produced an increase in yield of about 60 percent in comparison to initially applied parameters.

For the practice the model represents a tool for seeking optimal combinations of environmental control and crop management strategies for a Gerbera crop using the cultivar 'Moana' to maximise yield. For the research engineer in experimental stations an equipment is provided to test environmental control and crop management strategies in advance to identify extremes and senseful experimental parameters in dependence on the objective of the trial.

Keywords

Gerbera jamesonii
crop model
yield maximisation
environmental conditions
crop management

Inhaltsverzeichnis

Abstrakt (deutsch)	2
Schlagworte	2
Abstract (englisch)	3
Keywords	3
1 Grundlagen für die Entwicklung eines Simulationsmodells für die Gerberakultur.....	6
2 Stand der Literatur und abgeleitete Problematik	7
3 Zielsetzungen	10
4 Material und Methoden.....	13
4.1 Gerberakultur.....	13
4.1.1 Sortenwahl.....	13
4.1.2 Kulturverfahren	14
4.1.3 Prüfung des Einflusses der Bewässerung auf Wachstum und Ertrag.....	16
4.1.4 Wachstumsbeobachtungen	19
4.1.5 Transmissions- und Attenuationsmessungen.....	21
4.2 Gaswechsellmessungen	21
4.2.1 Messgerät.....	21
4.2.2 Messung der apparenten CO ₂ -Austauschrate	22
4.2.2.1 Temperatur und Licht	23
4.2.2.2 CO ₂	24
4.2.2.3 Blattalter	24
4.2.2.4 Leitfähigkeitswert und Stickstoffgehalt der Mattenlösung	24
4.2.2.5 relative Luftfeuchtigkeit.....	26
4.2.2.6 Mattenfeuchtigkeit	26
4.2.3 Messanordnung zur Bestimmung der Wurzelatmung.....	27
4.3 Verwendete Software	30
5 Ergebnisse	31
5.1 Blattflächenzuwachs.....	31
5.2 Blattverteilung	33
5.3 Pflanzenstruktur.....	34
5.4 Entwicklungszeit der Blätter.....	36
5.5 Transmissionrate	37
5.6 Attenuationskoeffizient	38
5.7 Bildung neuer Blätter	38
5.8 Blattsterberate	40
5.9 Blumenwachstum	42
5.10 Blumenparameter	42
5.11 Parameter der Photosynthese.....	44
5.11.1 Temperatur.....	45
5.11.2 CO ₂ -Konzentration der Luft	47
5.11.3 Alter der Blätter.....	49
5.11.4 Stickstoffgehalt der Mattennährlösung	52
5.11.5 Wasserdampfsättigungsdefizit	53
5.11.6 Wasserversorgung in der Steinwollmatte	60
5.11.7 Zusammenfassung der Photosyntheseparameter.....	64
5.12 Atmung	68
5.12.1 Sprossatmung	68
5.12.2 Wurzelatmung	69
5.13 Modellstruktur.....	73

5.13.1	Klima- und Wachstumsfaktoren	74
5.13.2	Untermodelle zur Photosynthese	75
5.13.2.1	P_n - Berechnung der Photosyntheseparameter	75
5.13.2.2	P_c - Berechnung der Brutto-CO ₂ -Austauschrate	76
5.13.2.3	P_d - Berechnung der täglichen Brutto-CO ₂ -Austauschrate	79
5.13.3	Hauptmodell	81
5.13.3.1	Substratspeicher	81
5.13.3.2	Partitionierung des Substrates	82
5.13.3.3	Blumenentwicklung	85
5.13.3.4	Wachstum der Blätter	88
5.14	Modellbeschreibung und -anpassung	93
5.15	Modellverhalten bei Blattverlust	101
5.16	Ertragsoptimierung	106
6	Diskussion und Schlussfolgerungen	110
6.1	Kurzübersicht über den Kenntnisstand und abgeleitetes Ziel der Arbeit	110
6.2	Ergebnis der Modellierung	110
6.3	Erstellung und Funktionsweise des Gerberamodells	112
6.4	Behandlung der Problematik in der Literatur	115
6.5	Wissenschaftliche Bewertung der Ergebnisse	119
6.6	Abgeleitete praktische Empfehlungen	120
6.7	Vorschläge für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen	120
7	Zusammenfassung	123
8	Literaturverzeichnis	125
Anhang A	- Liste der wichtigsten Messwerte des HCM-1000	131
Anhang B	- Umrechnung physikalischer Einheiten	132
Anhang C	- Verzeichnis aller Modellvariablen und -parameter	133
Anhang D	- Tabellenanhang	147
Anhang E	- Diagramme der partiellen Blattflächenindices	164
Anhang F	- Erläuterungen zu den ModelMaker-Diagrammen	166
	Erklärung zur Dissertation	168
	Danksagung	169

1 Grundlagen für die Entwicklung eines Simulationsmodells für die Gerberakultur

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein computergestütztes Simulationsmodell für eine Schnittblumen-Steinwollkultur mit *Gerbera jamesonii* (H. Bolus ex Hook.) am Beispiel der Sorte 'Moana' zu erstellen. Das Modell sollte die Einflüsse der von außen einwirkenden Umweltfaktoren auf Wachstum und Blumenertrag der Pflanzen darstellen.

Entwicklung und Gestaltbildung sind im Erbmateriale der Pflanzen genetisch determiniert und werden durch die Umwelt modifiziert. Wesentlich wird das Wachstum durch äußere Einflussgrößen wie Temperatur, Lichteinstrahlung, Wasser- und Nährstoffversorgung beeinflusst. Das Bestreben des Kultivateurs ist es, diese Faktoren so zu steuern, dass Wachstum und Ertrag quantitativ und qualitativ optimiert werden.

Gerbera gehören aufgrund ihrer ungünstigen Transporteigenschaften zu den Schnittblumen, deren Produktion auch weiterhin in europäischen Gartenbaubetrieben verbleiben wird. In Bezug auf die Gerbera-Kultur stehen Blumenertrag und -qualität im Vordergrund. Die Produktionsbedingungen sind jedoch in jedem Betrieb unterschiedlich, so dass empfohlene Kulturbedingungen nicht immer eingehalten werden können. Konstant eingestellte Sollwerte für die Klimaregelung sind Standard in der Praxis. Eine unmittelbare Berücksichtigung äußerer Einflussgrößen auf die Sollwerteinstellungen, um zum Beispiel Temperatur, Einstrahlung und CO₂-Angebot aufeinander abzustimmen und Kosten gering zu halten sowie den optimalen Ertrag zu erreichen, ist derzeit noch nicht durchführbar. Das Simulationsmodell sollte einen Beitrag zur Verbesserung der Produktivität der Kultur unter variablen Produktionsbedingungen bieten und eine Grundlage schaffen, die Klimasteuerung in Abhängigkeit der variablen Außenbedingungen beeinflussen zu können.

Aufgabe war es, die in der gärtnerischen Praxis mess- und regelbaren sowie bedingt steuerbaren Kulturbedingungen, wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Bewässerung und Pflanzenernährung, in Abhängigkeit von nicht beeinflussbaren äußeren Einflussgrößen, wie die Sonneneinstrahlung, zu optimieren, um die bestmögliche Ertragsleistung zu erzielen. Ein Teil der Arbeit war die kontinuierliche Ermittlung von Wachstumsdaten für eine Gerbera-Steinwollkultur in Abhängigkeit äußerer Klimafaktoren sowie der Wachstums- und Ordnungsparameter der Blattflächen und Blumen. Diese Daten dienten als Grundlage für die Modellierung des Pflanzenwachstums und als Kontrolldaten beim Durchlaufen des Modells unter den aufgezeichneten Klimabedingungen.

Die Parameter waren in einem computergestützten Simulationsmodell zusammenzufassen, das als Endergebnis das vegetative und generative Wachstum in Abhängigkeit der Zeit in Form von Wachstumskurven berücksichtigt. Unter Einbeziehung erhobener und kalkulativer Klimadaten musste die Möglichkeit bestehen, Wachstumsprognosen zu erstellen. Neben den sich ständig verändernden äußeren Kulturbedingungen sollten punktuell eintretende diskontinuierliche Ereignisse wie Blattflächenverluste durch manuelles Blattbrechen berücksichtigt werden, so dass deren Einfluss auf das Wachstum anhand der Wachstumskurven ables- und abschätzbar wird.

Das Modell stützte sich bei der Berechnung der Wachstumswerte auf experimentell ermittelte Daten. Neben den Wachstumsbeobachtungen wurden Gaswechsellmessungen zur Erfassung der Leistungsparameter der Photosynthese unter Berücksichtigung unterschiedlicher Klimabedingungen sowie Wurzelatmungsmessungen in

Abhängigkeit von Temperatur und Nährlösungskonzentration zur Ermittlung der Atmungsverluste im Wurzelbereich einbezogen.

Unter Berücksichtigung der Einflüsse der Wachstumsfaktoren auf physiologische Leistungsparameter wie CO₂-Aufnahme oder Atmung war es der Zweck des Modells, Aus- und Wechselwirkungen auf Wachstum und Ertrag in Abhängigkeit der Zeit zu verdeutlichen. Dabei sollte es ein neuartiges Hilfsmittel darstellen, um die Wechselwirkungen der Wachstumsfaktoren zu verstehen und deren Einfluss auf den Blümen-ertrag kalkulierbar zu machen. Außerdem sollte eine Prognose für den Blümen-ertrag unter definierten Umweltbedingungen ermöglicht werden.

2 Stand der Literatur und abgeleitete Problematik

Wachstumsmodelle stellen nicht nur eine Möglichkeit dar, die Wirkung der Umweltparameter auf Wachstum und Gestaltbildung der Pflanzen durchschaubar zu machen, sondern können neue Einblicke in Wachstumsvorgänge bieten und in Abhängigkeit von vorgegebenen Parametern entsprechende Verhaltensweisen der Pflanzen nachvollziehen. Stimmen die berechneten Daten eines parametergesteuerten Modells mit denen einer Kontrollkultur überein, kann es als Prognoseinstrument zur Vorhersage der Reaktionen des Pflanzenbestandes auf geänderte Umweltparameter herangezogen werden und somit der Forschung als Hilfsmittel zur Optimierung der Kulturverfahren dienen (THORNLEY und JOHNSON, 1990; JONES, 1992).

Nach HAMMER (1998) liegt bei der Erstellung von Wachstumsmodellen das größte Problem darin, die richtige Balance zwischen der Vereinfachung der Mechanismen und der Komplexität der zu untersuchenden Wachstumsvorgänge zu finden. Durchschaubarkeit und Vermeidung unnötiger Komplexität sollen bei der Modellierung als Richtlinien gelten. Dabei ist von Bedeutung, dass wissenschaftliche und hier insbesondere physiologische Erkenntnisse durch zu ermittelnde mathematische Funktionen wiedergegeben werden. Funktionen, denen kein physiologischer Bezug zugrunde gelegt wird, werden immer dann eingesetzt, wenn die tatsächliche Funktionsweise des zu beschreibenden Teilaspektes nicht vollends geklärt ist oder die Komplexität unnötig erhöht bzw. die Überschaubarkeit des Modells unter weiteren Detaildarstellungen leiden würde.

Vorausgesetzt, dass ein Modell in seiner Funktionsweise durchschaubar und verständlich ist sowie als Prognoseinstrument dienen kann, gibt es vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Zumeist werden in der Literatur Simulationsmodelle verschiedener Art eingesetzt, um Teilbereiche der pflanzlichen Physiologie zu beschreiben. Es existieren Modelle, die sich nur mit der Photosynthese und deren Beeinflussung durch Umweltfaktoren beschäftigen. Dabei muss differenziert werden, ob sie auf biochemischen Grundlagen (ACOCK et al., 1976, FARQUHAR et al., 1980), physiologischen Parametern (CHARLES-EDWARDS und LUDWIG, 1974; THORNLEY, 1974, 1976; MARSHALL und BISCOE, 1980 a; JOHNSON und THORNLEY, 1984, 1990) oder mathematischen Funktionen (FRICK et al., 1998) basieren. Weitere modellierbare Teilbereiche aus der Pflanzenphysiologie sind Wachstums- und Erhaltungssat-mung sowie Photorespiration (BARNES und HOLE, 1978; THORNLEY, 1976; BREEZE und ELSTON, 1983; HAHN, 1987; THORNLEY und JOHNSON, 1990). Andere Modelle versuchen, die Verteilung der durch die Photosynthese gewonnenen Kohlenstoffverbindungen zwischen Spross und Wurzel zu beschreiben (THORNLEY, 1969, 1972, 1976; COOPER und THORNLEY, 1976; PRIOUL und CHARTIER, 1977; REYNOLDS und THORNLEY, 1982; JOHNSON, 1985; JOHNSON und THORNLEY, 1987; MÄKELÄ und SIEVÄNEN, 1987; THORNLEY und JOHNSON, 1990; FARRAR und WILLIAMS, 1991; FUNNEL et al., 1998). Des weiteren gibt es

Ansätze für die Simulation der Umschaltung zwischen vegetativem und generativem Wachstum bei Blütenpflanzen (THORNLEY, 1972 b; CHARLES-EDWARDS et al., 1979; THORNLEY und COCKSHULL, 1980).

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen entwickelte man Wachstumsmodelle, in denen verschiedene Teilprozesse der Pflanzenphysiologie miteinander verbunden wurden, um Wachstumsprozesse für verschiedene Kulturpflanzen unter simulierten Umweltbedingungen sichtbar zu machen. Dabei beschränkte man sich zumeist auf das Wachstum einzelner Pflanzenteile wie Blatt, Spross, Wurzel oder Blüte (CLEMENT et al., 1976; ACOCK et al., 1978, 1979; CHARLES-EDWARDS et al., 1979; SHEEHY et al., 1980, 1996; JOHNSON et al., 1983; JOHNSON und THORNLEY, 1985; BRUGGE, 1985; BRUGGE und THORNLEY, 1985; JOHNSON und PARSONS, 1985; GOUDRIAAN und MONTEITH, 1990; THORNLEY und JOHNSON, 1990; HOPPER und HAMMER, 1991; RICHTER et al., 1991; AIKMAN und SCAIFE, 1993; HOPPER et al., 1994, 1996; WERKER und JAGGARD, 1997).

Nur wenige Modelle existieren, die das Wachstum der gesamten Pflanze in einem Bestand einschließlich der Wurzeln berücksichtigen. Ein solches wurde von JOHNSON und THORNLEY (1983) für Weidegras beschrieben, welches nicht nur die Blätter sondern auch das Wurzelwachstum und die Einflüsse äußerer Wachstumsfaktoren wie Temperatur, Einstrahlung und Stickstoffversorgung berücksichtigt.

Modelle finden in den Agrarwissenschaften bereits Anwendung. So entwickelte WIEBE (1995) ein empirisches Modell, das bei Kohlrabi auf der Basis von Vernalisationssummen eine Energieeinsparung aufgrund gezielterem Einsatz von Heizung und Lüftung zur Devernalisation erzielt. In empirischen Modellen, die zur Beschreibung ermittelter Daten herangezogen werden, wird mit Hilfe mathematischer Funktionen eine Beziehung zwischen unabhängigen und abhängigen Variablen aufgestellt. Mit empirischen Modellen können einfache direkte Zusammenhänge wiedergegeben werden. Die ermittelten Daten weisen aufgrund einer Optimierung bei Erstellung des Modells zumeist eine gute Korrelation zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen auf (THORNLEY und JOHNSON, 1990).

Die Art der mathematischen Funktion hängt von den ermittelten Daten ab, ein biologischer Zusammenhang ist nicht notwendig, so dass sich ein derartiges Modell über die physikalischen und biologischen Grenzen hinweg entwickeln kann. SCHACHT und SCHENK (1995, 1997) erstellten für Gewächshausgurken ein Modell zur Kontrolle der Düngung in einem erdelosen geschlossenen System auf der Basis des täglichen Stickstoffbedarfs in Abhängigkeit vom Pflanzenalter und der Einstrahlungssumme. Die Bedarfsberechnung erfolgte unter Berücksichtigung des Wachstumsstadiums der Pflanzen über unterschiedliche Funktionen, so dass die Grenzen der Gültigkeit des empirischen Modells durch das Pflanzenalter gesetzt werden.

Weitere Beispiele für die Anwendung empirischer Modelle sind die Berechnung des Längenwachstums von Topfchrysanthemen nach STEINBACHER et al. (1993), wobei die Prognose des Längenwachstums auf einem multiplikativen Index beruht, der sich aus weiteren Teilindices für Temperatursumme, Temperaturmittelwert, Lichtintegral, Lichtqualität, und verabreichter Wassermenge ableitet. HOPPER und HAMMER (1991) entwickelten ein Wachstumsmodell für Schnittrosen auf der Basis multipler Regressionen, das über Polynome dritten und vierten Grades den Zuwachs an Sprosslänge und die Frisch- und Trockengewichte der Sprosse, Blätter, Blumen und der gesamten Pflanze aufgrund der photosynthetisch aktiven Einstrahlung sowie der Tag- und Nachttemperaturen berechnet.

Sollen Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Variablen modelliert werden, wie sie zum Beispiel zwischen der von der Einstrahlungsstärke abhängigen Netto-CO₂-Austauschrate aller Blätter eines Bestandes und der wachsenden Blatt-

fläche, die sich wiederum auf die Netto-CO₂-Austauschrate des Bestandes auswirkt, bestehen, müssen empirische Modelle mit multivariaten Simulationsmodellen kombiniert werden (HAMMER, 1998).

Multivariate Simulationsmodelle bauen sich aus mehreren Untermodellen auf, die kombiniert die Funktionsweise auf einer übergeordneten Ebene bestimmen. Zwischen den funktionellen Gruppen findet dabei ein Datenaustausch statt, der über Parameter gesteuert werden kann. JOHNSON und THORNLEY (1985) entwickelten ein Modell, das das Wachstum von Weidegras in Abhängigkeit von Klimaparametern und der Stickstoffdüngung simuliert. Die Parameter nehmen dabei Einfluss auf Lichtabsorption, Photosynthese, Assimilat- und Stickstoffverwendung, Blattflächenwachstum, Wachstums- und Erhaltungsatmung, Alterung, Absterbeerscheinungen einschließlich Rückführung von Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen, Auswaschung von Nährstoffen aus dem Boden und Mineralisierung organischer Abfallstoffe. Es war ihr Ziel, aufgrund unterschiedlich hoher Düngergaben, den Stickstoffgehalt und das Wachstum der Pflanzen abzuschätzen.

Untermodelle beeinflussen nicht nur Funktionen auf übergeordneten Ebenen, sondern auch sich gegenseitig. Den Verbindungen zwischen den Modellteilen liegen mathematisch beschriebene Mechanismen zugrunde, die nach Möglichkeit in Zusammenhang mit Aspekten der Pflanzenphysiologie stehen und den Fluss von Energie, Massen oder Informationen so realistisch, aber auch so einfach wie möglich, aufzeigen sollten. Häufig bestehen Untermodelle aus empirischen Modellen bzw. mathematischen Funktionen, wenn eine weitere Unterteilung nicht möglich oder gewünscht ist.

Ein umfassendes Simulationsmodell für eine gärtnerische Kultur, das nicht nur die CO₂-Assimilation, sondern auch die Nährstoffaufnahme sowie das vegetative und generative Wachstum der Pflanzen aufzeigt, ist bislang nicht entwickelt worden.

3 Zielsetzungen

Interaktionen zwischen beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Kulturparametern und deren Einflüsse auf Wachstum und Blümenertrag der Gerbera erschweren in der Praxis die Wahl einzustellender Klima-, Bewässerungs- und Düngungsparameter. Ebenso erhöhen diese in Forschungseinrichtungen den Aufwand zur Überprüfung der Einflussgrößen in Bezug auf die Optimierung der Kulturverfahren. Die vielfältigen Wechselwirkungen können nur in einem Simulationsmodell, das die Kultur so realistisch wie möglich wiedergibt, dargestellt werden. Eine gezielte Berechnung von einstellbaren Parametern für die Kulturführung unter gegebenen nicht beeinflussbaren äußeren Einflussgrößen zur Maximierung von Wachstum und Ertrag war die wesentliche Zielstellung des zu entwickelnden Kulturmodells.

Auf dem derzeitigen Stand des Wissens bei der Modellierung des Pflanzenwachstums sind in der Literatur zumeist nur Teilmodelle zu finden, die sich entweder auf das Wachstum von Pflanzenteilen oder physiologische Teilprozesse beziehen. Es existieren keine Modelle, die basierend auf physiologischen Leistungsparametern das vegetative und generative Wachstum einer Gerberakultur berechnen können.

- Vorrangiges Ziel dieser Arbeit war es, ein computergestütztes Simulationsmodell, basierend auf der Kohlendioxid-, Wasser- und Stickstoffaufnahme der Pflanzen, sowie dem vegetativen und generativen Wachstum bis hin zur Ernte der Schnittblumen in Abhängigkeit von äußeren Einflussgrößen zu erstellen und Zusammenhänge in Form von Wachstumskurven zu verdeutlichen. Die Einflüsse klimatischer und kulturtechnischer Faktoren wie Bewässerung und Düngung auf Wachstum und Blümenertrag der Gerbera in einem Hydrokultursystem sollten mit Hilfe des Modells prognostiziert und berechenbar werden. Aufgabe war es, dem Praktiker eine Entscheidungshilfe zu vermitteln, womit er optimale Kulturbedingungen einstellen kann. Dem Versuchsansteller sollte das Modell die Entscheidung erleichtern, für das Versuchsziel sinnvolle Umweltparameter auszuwählen, Extremwerte zu identifizieren und diese in seiner Planung berücksichtigen zu können.
- Für die Modellierung des Wachstums von Pflanzenteilen oder physiologischen Teilprozessen wurden bislang vielfältige Modellansätze verwendet. Es war nicht Ziel dieser Arbeit, diese Vielfalt durch weitere Modellstrukturen zu erweitern, sondern vielmehr die in der Literatur beschriebenen Teilsimulationen zu sichten und geeignete bei der Erstellung des Gerberamodells zu verwenden. Bekannte Modellteile, die übernommen werden konnten, waren die zur Berechnung der Photosynthese und Atmung, der Stickstoffaufnahme und der Assimilatpartitionierung. Diese Teilmodelle waren an die Anforderungen der Gerberakultur anzupassen. Die notwendigen Verknüpfungen mussten geschaffen werden. Hinsichtlich der Steuerung von vegetativem und generativem Wachstum sowie der Blattaltersstruktur bestand die Aufgabe für die Gerbera spezifische Teilmodelle zu entwickeln und einzubinden.
- Das Ziel der Arbeit war es, in einer Gerbera-Steinwollkultur den räumlichen Pflanzenaufbau und zeitlichen Wachstumsverlauf am Beispiel der Sorte 'Moana' zu ermitteln. Dazu sollten in der Literatur vorgestellte Teilmodelle auch anderer Pflanzenarten einbezogen werden, da diese für die Gerbera fehlten. Die Ermittlung von Wachstums- und Ertragsdaten war Grundlage für die Modellerstellung unter Berücksichtigung von Klima-, Düngungs- und Bewässerungsparametern. Die in einer Steinwollkultur mit der Sorte 'Moana' durchgeführten Wachstumsbe-

obachtungen sollten die für eine Verifizierung des Modells notwendigen Blattwachstums- und Blumenertragsdaten zur Verfügung stellen.

- Von Bedeutung für die Entwicklung des Bestandes und des Blumenertrages sind Wachstum und Altersstruktur der Blätter, Wurzeln und Blumen. Aufgabe war es, dieses unter Berücksichtigung der Wachstumsbeobachtungen an der Gewächshauskultur innerhalb des Modells darzustellen. Dabei waren die rückkoppelnden Auswirkungen des Pflanzenwachstums auf die Photosyntheseleistung und Stickstoffaufnahme entsprechend einzubinden.
- Da der Literatur keine Angaben zum Einfluss von Umweltparametern und Blattalterung auf die Photosynthese zum Aufbau energiespeichernder Kohlenhydrate für die Gerbera zu entnehmen waren, mussten für die Erstellung des Modells in gesonderten Versuchsreihen Leistungsparameter des Gaswechsels und der Stickstoffaufnahme an Pflanzen der Sorte 'Moana' in Gefäßversuchen untersucht werden. Zur Definition der interaktiven Auswirkungen sollten für die Berechnungen der Photosyntheseleistung und Stickstoffaufnahme Gleichungssysteme unter Berücksichtigung äußerer Einflussgrößen erstellt werden. Die Prüffaktoren in den Versuchen zur Bestimmung des Gaswechsels waren daher Temperatur, Einstrahlung, CO₂-Konzentration der Luft, Blattalter, Mattenfeuchtigkeit, EC-Wert und Stickstoffgehalt der Mattenlösung sowie die relative Luftfeuchtigkeit. Bei den Versuchen zur Stickstoffaufnahme waren Wurzelraumtemperatur und Stickstoffgehalt der Mattenlösung zu berücksichtigen.
- Die Entwicklung des Modells sollte mit den Berechnungen für die Energie und Substrat liefernden Photosynthesevorgänge und der Stickstoffaufnahme durch die Wurzeln beginnen (Abb. 1). Die daraus resultierenden Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen waren in einem Speicher zu sammeln, bevor sie für Wachstums- und Energiefreisetzungs Vorgänge genutzt werden konnten. Danach musste die Aufteilung des vorhandenen Substrates auf die Pflanzenteile Spross und Wurzel folgen, wobei ein Teil des für den Sprosszuwachs zur Verfügung stehenden Substrates in die Blumenentwicklung einzugehen hatte. Die Anzahl entwickelter bzw. geernteter Blumen sollte als Ernteprodukt kumulativ ausgewiesen werden. Damit sich ein geschlossener Kreislauf ergab, war eine rückkoppelnde Auswirkung der Blattflächen- und Wurzelentwicklung auf Photosynthese und Stickstoffaufnahme einzubinden.
- Im Anschluss an die Erstellung des Modells waren die berechneten Wachstums- und Ertragsdaten mit denen der im Gewächshaus durchgeführten Steinwollkultur unter gleichen Klima-, Bewässerungs- und Düngungsbedingungen zu vergleichen, um das Modell zu verifizieren. Ziel war es, eine möglichst genaue Übereinstimmung mit den beobachteten Wachstumsdaten zu erreichen, um die Eignung zur Simulation der Gerberakultur am Beispiel der Sorte 'Moana' zu belegen.
- Um die Wachstumsprognosen des Modells zusätzlich zu überprüfen, galt es, ein diskontinuierliches Ereignis wie manuelles Blattbrechen zu simulieren und die berechneten Wachstumswerte mit nach dem Stand der Literatur zu erwartenden Reaktionen zu vergleichen.
- Zur Überprüfung der Eignung des Modells sollte eine Umkehr der Modellfunktion vorgenommen werden, bei der nicht das Wachstum unter vorgegebenen äußeren Einflussgrößen berechnet, sondern eine Optimierung dieser Größen bei Maximierung des Ertrages zu erzielen war. Die Fähigkeit zur Optimierung einzelner Wachstumsparameter stellt die Grundvoraussetzung für den Einsatz des Modells

zur Unterstützung bei der Wahl einzustellender Klima-, Bewässerungs- oder Düngungsgrößen dar. Zielsetzung dieser Arbeit war es, optimale Umweltparameter am Beispiel der Sorte 'Moana' zu berechnen und den Ertragsverlauf unter gleichbleibenden äußeren Bedingungen darzustellen.

- Ein wesentliches Anliegen bestand daran, Möglichkeiten zur Anwendung und Weiterentwicklung des Modells für die Praxis und in Versuchsvorhaben aufzuzeigen.

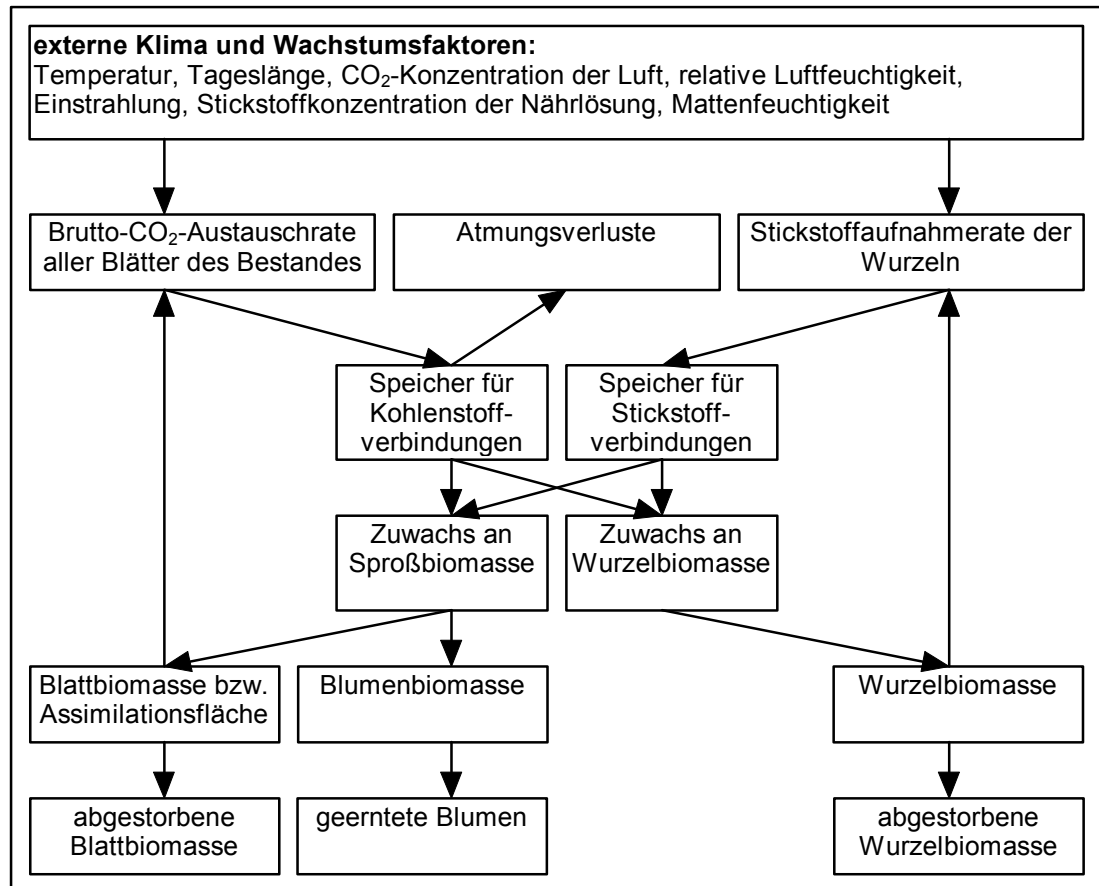


Abb. 1: Struktur des zu erstellenden Modells zur Simulation der Kultur von *Gerbera jamesonii* am Beispiel der Sorte 'Moana'.

4 Material und Methoden

4.1 Gerberakultur

Die Erstellung, Kalibrierung und Verifizierung des Gerbera-Simulationsmodells sollte auf der Basis von in einer Hydrokultur ermittelten Wachstums- und Ertragsdaten erfolgen. Eine Gerbera-Hydrokultur auf Steinwollmatten wurde im Gewächshaus angelegt, um das vegetative und generative Wachstum des Bestandes in Abhängigkeit von den vorherrschenden Klimabedingungen innerhalb eines Jahres zu beobachten und die Messwerte der entsprechenden Prüfmerkmale (Abschnitt 4.1.4) festzuhalten.

Während der Kulturphase erfolgte eine Entnahme von Pflanzen aus dem Bestand für die Bestimmung der Leistungsparameter des Gaswechsels und der Stickstoffaufnahme, so dass alle Pflanzen für die beschriebenen Versuchsreihen unter gleichen Bedingungen herangezogen wurden.

4.1.1 Sortenwahl

Für die Gerbera-Hydrokultur auf Steinwollmatten und die Versuchsreihen zur Bestimmung des Einflusses der Klima- und Kulturparameter auf Gaswechsel und Stickstoffaufnahme wurde die Sorte 'Moana' ausgewählt (Piet Schreurs De Kwakel B. V., De Kwakel, NL, Abb. 2 und 3). Aufgrund begrenzter Versuchsflächen im Gewächshaus und der großen Anzahl an durchzuführenden Gaswechselmessungen konnte nur eine Sorte aus dem genetisch vielfältigen Sortiment der Gerbera als Schnittblume untersucht werden. Die Sorte 'Moana' wurde gewählt, da deren Eigenschaften nach Auskunft des Züchters keine extremen Ansprüche an die Kulturführung verlangten, sie für die Steinwollkultur geeignet war und sich hinsichtlich ihrer Produktionsdaten im mittleren Bereich des Sortimentes befand. Die Sorte 'Moana' wurde mit folgenden Produktionsdaten angegeben:

Blumendurchmesser:	10 bis 12 cm
Stiellänge:	55 cm
Blumenproduktion bei Bodenkultur:	170 bis 190 Bl. m ⁻² J ⁻¹
Blumenproduktion bei Hydrokultur:	220 bis 240 Bl. m ⁻² J ⁻¹
Vasenhaltbarkeit in Wasser:	12 bis 14 Tage
(Quelle: Mitteilung Piet Schreurs De Kwakel B.V., De Kwakel, NL, 1996)	



Abb. 2: *Gerbera jamesonii* 'Moana' als Einzelblume.



Abb. 3: *Gerbera jamesonii* 'Moana' in der Hydrokultur auf Steinwollmatten.

4.1.2 Kulturverfahren

Die Gerberakultur wurde am 11.06.1996 auf einer 7,5 x 12,0 m großen Fläche in einer Gewächshausabteilung aufgepflanzt. Die Abteilung war Teil eines 9,4 m breiten deutschen Normgewächshauses mit 2,5 m hohen Seitenwänden, einer Stehwandlüftung zur Südseite und Firstlüftungen. Die Verglasung bestand aus einfachem Klarglas, in Traufenhöhe befand sich eine Schattierung aus Gewebe. Das Gewächshaus war in Ost-West-Richtung angelegt, wobei sich an die Versuchsabteilung in Ost- und West-Richtung weitere Abteilungen anschlossen. An die Nordseite grenzte ein 3 m breiter Gewächshausverbinder.

Zur vorbeugenden Unkrautbekämpfung und besseren Reflektion des Lichtes erfolgte eine Abdeckung des Bodens der Versuchsabteilung mit 100 g m⁻² schwerem weißen Polypropylen Bändchengewebe My-Pex (Meyer, Rellingen). Für die Gerberakultur wurden acht Beete eines Gerbera-Rinnenkultursystems in Nord-Süd-Richtung mit 70 cm Abstand aufgebaut. Die Rinnen bestanden aus kunststoffbeschichteten in W-Form gepressten Stahlblechen (Preforma, Hoek van Holland, NL). Diese waren 15 cm breit und 10 cm hoch. Die Substratmatten lagen dabei auf einem 2,5 cm hohen Steg, so dass das Drainwasser seitlich davon in Ablaufkanälen abfließen konnte. Als Substrat fanden 1 m lange, 15 cm breite und 7,5 cm hohe in Folie eingeschweißte Grodan Gerbera Mastermatten aus Steinwolle (Grodania A/S, Hedehusene, DK) Verwendung. Vor dem Pflanzen wurde die Folie auf der Unterseite der Matten mit einem Messer perforiert und auf der Oberseite mit 10 x 10 cm großen Pflanzlöchern im Abstand von 15 cm versehen.

Ein Beet bestand aus zwei Rinnen, die mit leichtem Gefälle auf 60 cm hohen und 75 cm breiten Stahlrohrrahmenständern angebracht waren, um Ernte- und Pflegearbeiten zu erleichtern. Unterhalb der Rinnen hingen 20 x 1,9 mm durchmessende Polyethylen-Heizungsrohre (BE de Lier BV, Sevenum, NL), die ständig mit einer Vorlauftemperatur von 25 °C betrieben wurden. Als Oberheizung waren jeweils in der Mitte des Beetes in circa 1 m Höhe vom Boden entfernt 3/4" Forcas-Heizungsrohre aus weiß lackiertem Stahl (Hoogovens Buizen BV, Oosterhout, NL) angebracht. Die Bewässerungsdüngung erfolgte über 20 x 1,6 mm durchmessende Polyethylen-Rohre, aus denen heraus 1 m lange Polyethylen Kapillarschläuche mit einer Durchflussleistung von 2 l min⁻¹ bei 1 bar abzweigten und mit PVC-Steckern in unmittelbarer Nähe der Pflanzen in der Steinwolle befestigt waren. Aus den Steinwollmatten drainierende Nährlösung wurde in den Ablaufkanälen aufgefangen und zu einem Langsamfiltrationssteinwollfilter zur Desinfektion zurückgeführt, um sie nach der Reinigung wieder zu verwenden.

Die Pflanzen der Sorte 'Moana' wurden in 10 x 10 cm durchmessenden und 6 cm hohen Steinwollblöcken von einer Jungpflanzenfirma (Piet Schreurs De Kwakel BV, De Kwakel, NL) bezogen und direkt nach Lieferung auf die Steinwollmatten gesetzt.

Die Klimasteuerung innerhalb der Gewächshausabteilung regelte ein Klimacomputer (Weimar Nachf. GmbH, Salzgitter). In den ersten vier Kulturwochen betrug der Heiztemperatursollwert 22 °C bei 28 °C Lüftungstemperatur. Danach wurden die Sollwerte für weitere vier Wochen entsprechend auf 20 °C und 25 °C herabgesetzt. Im Anschluss folgte eine Sollwerttemperaturänderung auf 17 °C Heiztemperatur tagsüber von 6.00 bis 19.00 Uhr und nachts auf 16 °C von 19.00 bis 6.00 Uhr. Die Lüftungstemperaturen lagen bei 19 °C tags und nachts. Ab der zwölften Woche nach dem Pflanztermin wurde abweichend von den zuletzt genannten Sollwerteinstellungen in der Zeit von 6.00 bis 7.00 Uhr eine Heiztemperaturerhöhung auf 20 °C eingebaut, um die Pflanzen morgens durch eine Erhöhung der Transpirationsleistung zu aktivieren.

Tab. 1: Zusammensetzung einer Einzelsalznährlösung für die Gerberakultur wie sie am Gartenbauzentrum Westfalen-Lippe in Münster-Wolbeck erstellt wurde.

EC-Wert	1,4 mS/cm*
NO ₃ -N	131 mg/l
NH ₄ -N	13 mg/l
P ₂ O ₅	41 mg/l
K ₂ O	142 mg/l
MgO	28 mg/l
CaO	175 mg/l
Fe	1,65 mg/l
Mn	0,29 mg/l
Zn	0,44 mg/l
B	0,27 mg/l
Cu	0,05 mg/l
Mo	0,03 mg/l
Rezeptur für 100 l einer 100-fach konzentrierten Stammlösung in Regenwasser:	
7,5 l Fertigro CN, fl. Kalksalpeter (Kemira GmbH, Hannover)	
1,6 kg Ammoniumnitrat	
1,7 kg Monokaliumphosphat	
0,4 kg Kaliumsulfat	
2,5 kg Magnesiumsulfat	
3,8 kg Kaliumnitrat	
100 ml Eisenchelat (flüssiges Fe-DTPA 6 %)	
100 g Eisenchelat EDDHA	
8 g Mangansulfat	
9 g Zinksulfat	
19 g Borax	
1 g Kupfersulfat	
1 g Natriummolybdat	

* Analysenwerte der LUFA (LK Westfalen-Lippe)

Die Innenschattierung schloss sich bei einer Außeneinstrahlung größer als 700 W m⁻², wobei ein Restspalt von 40 % geöffnet blieb. Im Zeitraum vom

08.10.1996 bis 01.04.1997 schaltete sich bei einer Außenlichtstärke kleiner als 7000 lux in der Zeit von 6.00 bis 22.00 Uhr eine Zusatzbelichtung mit 400 W Hochdruck-Natriumdampf Lampen SON-T Agro 400 montiert in Leuchten SGR-K-200 (Philips GmbH, Köln) ein. Vom 05.12.1996 bis 01.04.1997 wurde während der Belichtungszeit zudem die CO₂-Konzentration innerhalb der Gewächshausabteilung durch Zufuhr von technischem CO₂ auf 800 ppm erhöht.

Pflanzenschutzmaßnahmen gegen tierische Schädlinge erfolgten mit konventionellen Insektiziden. Gegen Echten Mehltau wurde vorbeugend während der Nacht von 22.00 bis 2.00 Uhr Netzschwefel in Kombifix-Verdampfern (Roald Mähler, Berlin) verdampft.

Bei der Bewässerungsdüngung kam eine Einzelsalznährlösung zum Einsatz, die auf das Gießwasser, in diesem Fall Regenwasser, und den Bedarf der Gerberakultur in mehreren vorangegangenen Versuchen abgestimmt wurde (Tab. 1). Ein Düngungscomputer (BE de Lier BV, Sevenum, NL) mischte aus zwei Stammlösungen die Nährlösung an und leitete diese zu Vorratstanks in der Nähe der Versuchsabteilung.

4.1.3 Prüfung des Einflusses der Bewässerung auf Wachstum und Ertrag

Bei der Verifizierung des Simulationsmodells sollten der Einfluss der Bewässerungsstrategie auf Wachstum und Blumenерtrag der Gerbera berücksichtigt und die berechneten Werte mit denen einer Gewächshauskultur verglichen werden. Dazu waren die Prüfmerkmale, wie in Abschnitt 4.1.4 aufgeführt, in der beschriebenen Gerberakultur mit dem Prüffaktor 'Bewässerungsstrategie' unter den in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Kulturbedingungen zu untersuchen.

Aus Vorratstanks heraus erfolgte die Bewässerung über Zusatzpumpen auf der Basis von drei verschiedenen Bewässerungsstrategien. Von den acht vorhandenen Beeten wurden die Randbeete nicht für die Versuchsauswertung berücksichtigt, so dass jeweils zwei Beete mit je zwei Rinnen eine Bewässerungseinheit darstellten. Die Randbeete erhielten den Bewässerungsimpuls gleichzeitig mit den direkt daneben liegenden Versuchsbeeten.

Beim ersten Prüfglied des Prüffaktors 'Bewässerungsstrategie' wurde ohne Überschussbewässerung gedüngt (Abb. 4). Nur bei Anhäufung von Salzen in der Mattenlösung erfolgte eine Überschussbewässerung (Abb. 5). Die Messung der Mattenfeuchte übernahm ein Analogtensiometer in Kerzenform, das sich auf einem Beet des entsprechenden Prüfgliedes in der Steinwollmatte befand. Die Daten des Analogtensiometers wurden in einem Tensiomat-Bewässerungscomputer (Einheitserdewerk Balster, Fröndenberg) mit Sollwerten für die Auslösung eines Bewässerungsimpulses verglichen und lösten bei Unterschreiten dieses Wertes den Impuls aus. Eine Bewässerung war nur in der Zeit von 7.00 bis 17.00 Uhr erlaubt, wenn der Tensiometerwert -21 hPa unterschritt. Die Bewässerungsdauer war auf eine Minute festgelegt, um ein Ausdrainieren von Nährlösung zu vermeiden. Die Einstellung des EC-Wertes der Nährlösung folgte während des Kulturzeitraumes dynamisch dem Wachstum der Pflanzen unter Berücksichtigung der Veränderung des EC-Wertes in der Mattennährlösung im Bereich von 0,6 bis 1,7 mS cm⁻¹ (Abb. 6).

Die Bewässerungssteuerung des zweiten Prüfgliedes löste eine Zeitschaltuhr im Zeitraum zwischen 7.00 und 17.00 Uhr für jeweils drei Minuten aus. Die Häufigkeit variierte in Abhängigkeit der Jahreszeit zwischen zwei und sechs Bewässerungsvorgängen pro Tag. Bei jedem Bewässerungsvorgang drainierten bei dieser Variante in Abhängigkeit von der Trockenheit der Steinwollmatte im Tagesmittel zumeist zwischen 10 und 30 % der Mattenlösung aus. Der EC-Wert der verabreichten Nährlö-

sung wurde zwischen 1,4 und 1,8 mS cm⁻¹ in Abhängigkeit vom Wert in der Mattenährlösung dem Wachstum dynamisch angepasst (Abb. 4, 5 und 6).

Ebenfalls im gleichen Zeitraum steuerte eine Zeitschaltuhr die Bewässerung des dritten Prüfgliebes. Dabei dauerte der erste Bewässerungsvorgang drei Minuten und die darauf folgenden jeweils eine Minute. Das Ziel dieser Ansteuerung war, beim ersten Bewässerungsvorgang mit viel Drainährlösung zu arbeiten und im Laufe des Tages die Drainmenge zu reduzieren. Die Anzahl an Bewässerungsvorgängen variierte von drei bis sieben pro Tag, wobei das Tagesmittel des Drainwasseranteils zu meist zwischen 5 und 20 % betrug. Die Einstellung des EC-Wertes folgte der des zweiten Prüfgliebes (Abb. 4, 5 und 6).

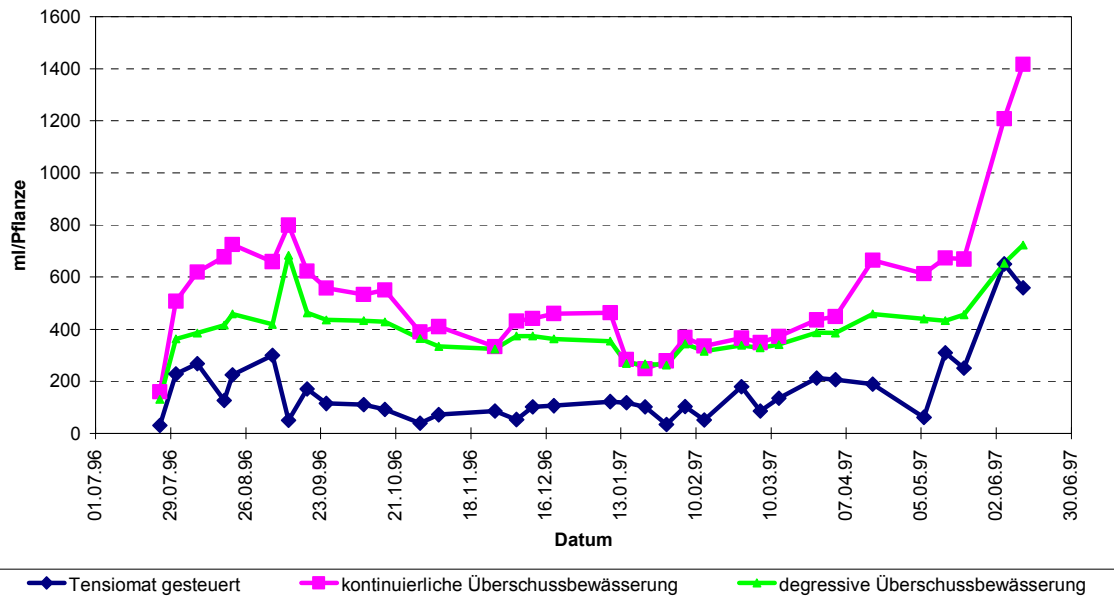


Abb. 4: Nährlösungsverbrauch von *Gerbera jamesonii* 'Moana' in der Hydrokultur bei unterschiedlichen Bewässerungsstrategien.

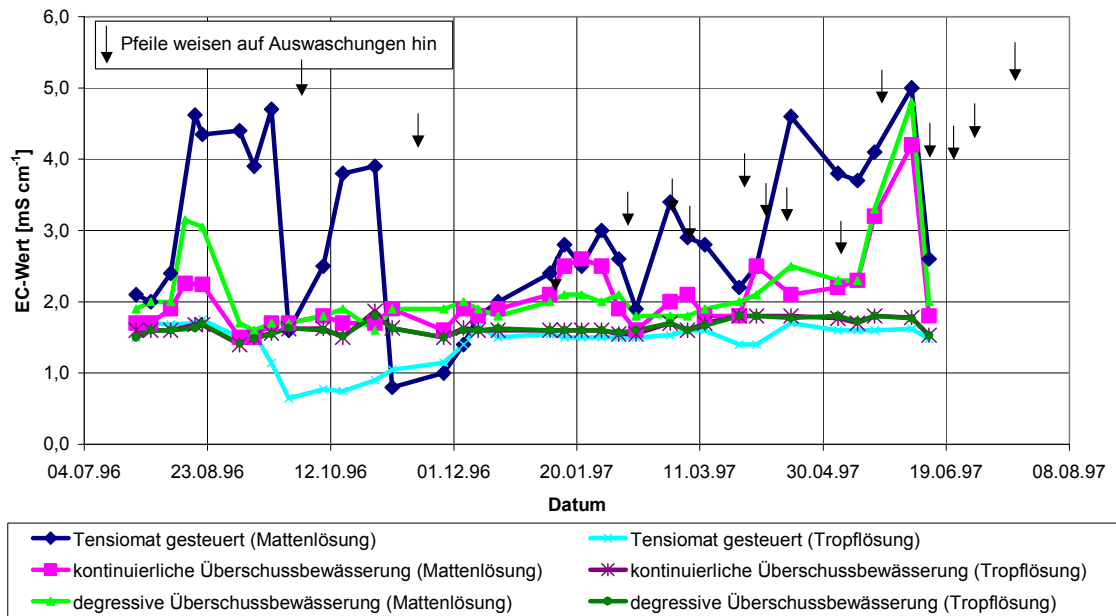


Abb. 5: Leitfähigkeitsverlauf (EC-Wert) in der Mattenlösung bei der Hydrokultur von *Gerbera jamesonii* 'Moana' bei unterschiedlichen Bewässerungsstrategien.

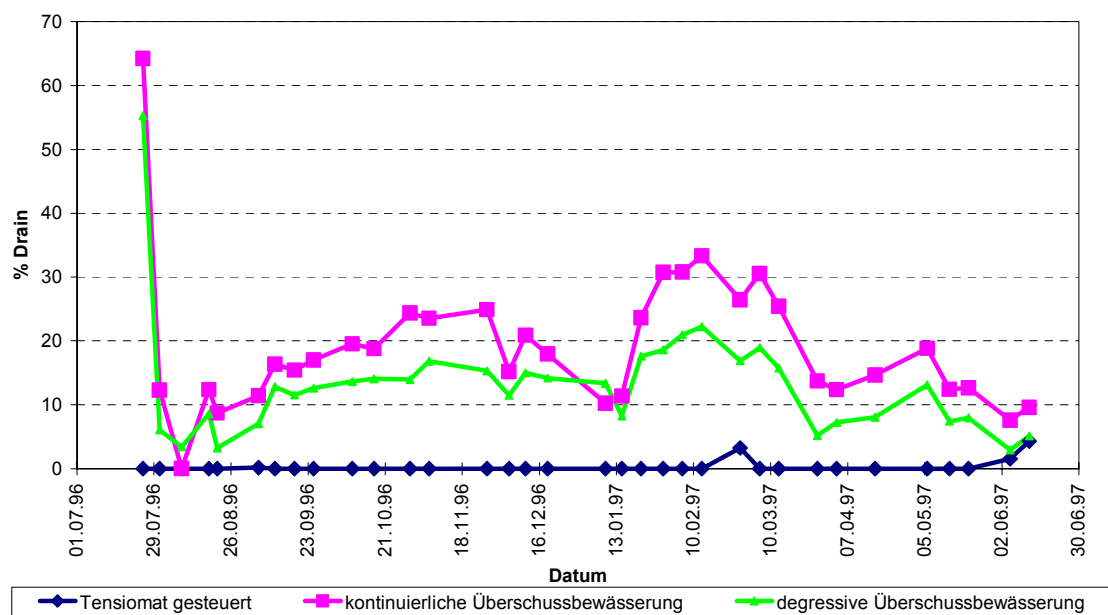


Abb. 6: Drainwasseranteil an der täglichen Nährlösungsgabe bei der Hydrokultur von *Gerbera jamesonii* 'Moana' bei unterschiedlichen Bewässerungsstrategien.

4.1.4 Wachstumsbeobachtungen

Der Zweck der Wachstumsbeobachtungen bestand darin, Daten über das räumliche und zeitliche Wachstum von Pflanzenorganen der Gerbera am Beispiel der Sorte 'Moana' zu ermitteln, um diese bei der Modellierung des vegetativen und generativen Wachstums zu verwenden. Speziell die Daten der Blattflächen- und Blumenertragsentwicklung in Abhängigkeit der Umweltparameter sollten zur Verifizierung des Modells herangezogen werden.

Zur Erhebung der an der Pflanze zu untersuchenden Prüfmerkmale Blattfläche, Trockengewicht von Blättern und Blumen, spezifisches Blattflächentrockengewicht, Blumenstiellänge und -durchmesser, Blütenstandsdurchmesser, Alter von Blättern und Blumen sowie räumliche Anordnung der Blätter wurden zwölf Pflanzen, vier je Prüfglied, innerhalb des Bestandes markiert und anfangs wöchentlich, nach sechs Monaten in Abständen von zwei bis drei Wochen, hinsichtlich ihres Zuwachses an Blättern und Blumen untersucht.

Der Zuwachs an Blattfläche musste an intakten Pflanzen im Bestand vorgenommen werden. Bei den Messungen konnten daher nur die Längen und Breiten der Einzelblätter ermittelt werden. Um die Blattfläche bestimmen zu können, wurden vor Beginn der Wachstumsbeobachtungen von vergleichbaren Pflanzen 100 Blätter verschiedener Größe geschnitten und mit einem Bildanalysegerät WinDias (Delta-T Devices Ltd., Cambridge, GB) hinsichtlich Breite, Länge und Fläche vermessen. Das Bildanalysegerät bestimmte die Blattparameter aufgrund einer schwarz/weiß Schattenrissprojektion des Blattes, die auf dem Bildschirm des dazugehörigen Computermonitors abgebildet wurde. Dabei wurde die Ausdehnung der schwarzen Bildpunkte, die der Blattfläche entsprachen, in horizontaler und vertikaler Richtung sowie die Gesamtfläche bestimmt. Anschließend erfolgte eine Regressionsanalyse der Blattfläche auf der Basis des Produktes aus Blattbreite und -länge. Mit der resultierenden linearen Beziehung mit einem Bestimmtheitsmaß von $B=0,99$ wurde die Grundlage geschaffen, während der Wachstumsbeobachtungen die Berechnung des Prüfmerkmals Blattfläche mittels der Messgrößen Blattbreite und -länge durchführen zu können (Abb. 7).

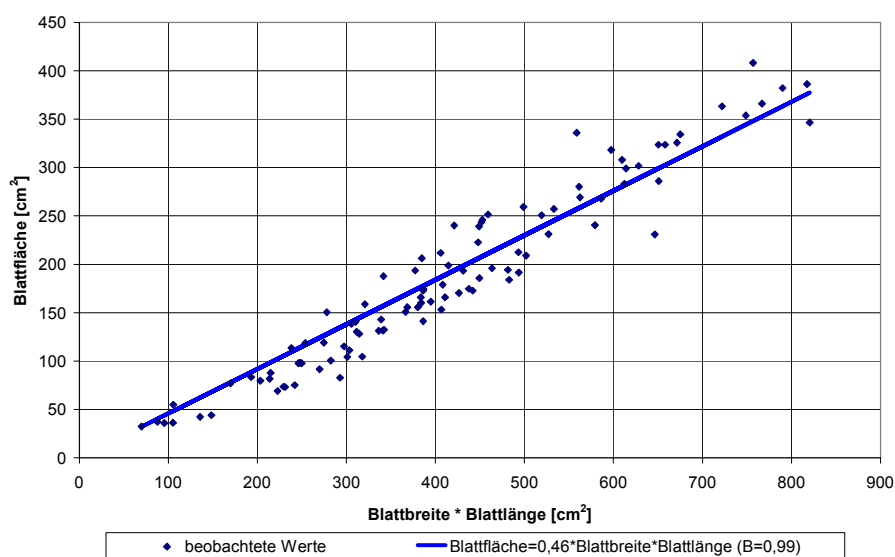


Abb. 7: Korrelation zwischen dem Produkt aus Blattlänge und -breite und der mit der Bildanalyse gemessenen Blattfläche (Anhang D, Tab. 8).

Im Anschluss an die Messungen am Bildanalysegerät fand eine Trockengewichtsbestimmung der entsprechenden Blätter statt. Die Blätter wurden einzeln in Papiertüten verpackt in einem Trockenschrank bei 105 °C Tage auf Gewichtskonstanz getrocknet. Mittels Regressionsanalyse des Prüfmerkmals Trockengewicht und der zuvor ermittelten Blattfläche konnte mit einem Bestimmtheitsmaß von $B=0,98$ eine lineare Beziehung und das spezifische Blattflächentrockengewicht in g Blattrockengewicht cm^{-2} Blattfläche bestimmt werden (Abb. 8).

An den Blumen erfolgte während des Streckungswachstum eine Messung der Stiellängen und zur Erntereife zusätzlich der Stiel- und Blütenstanddurchmesser. Alle geernteten Blumen wurden anschließend in einem Trockenschrank bei 105 °C auf Gewichtskonstanz getrocknet, um das Trockengewicht zu bestimmen.

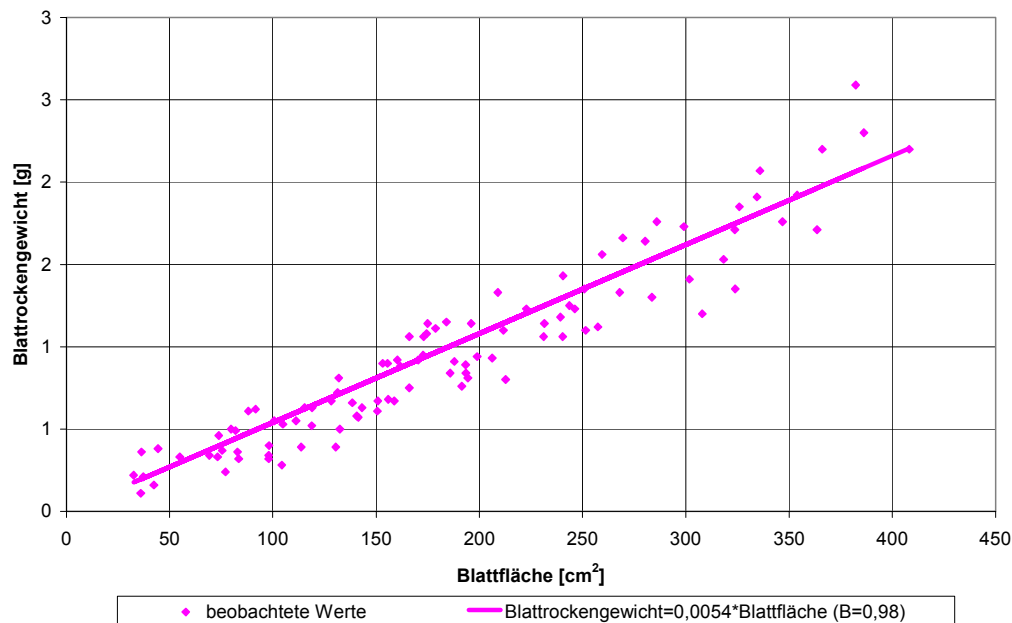


Abb. 8: Korrelation zwischen Blattfläche und Blattrockengewicht (Anhang D, Tab. 8).

Sobald ein neues Blatt oder eine neue Blume am Vegetationspunkt mit einer Länge bzw. einem Durchmesser von zwei bis fünf Millimetern sichtbar war, wurde das entsprechende Datum als erster Tag der Blatt- bzw. Blumenentwicklung gewertet. Alle Blätter und Blumen erhielten, sobald sie ausreichend groß waren, ein Schlaufenetikett mit einer Nummer, um sie identifizieren und das Wachstum fortlaufend dokumentieren zu können. Das Datum, an dem die sich entwickelnden Blätter und Blumen visuell erkennbar waren und das, zu dem die Blätter altersbedingt vertrocknet waren oder bei Pflege- bzw. Erntemaßnahmen abgerissen wurden, sowie bei den Blumen das Erntedatum bildeten die Basis für die Berechnung des Blatt- bzw. Blumenalters.

Neben der Blattfläche wurden auch die Richtung, in die sich das Blatt ausstreckte, und der Blattwinkel im Verhältnis zur Horizontalen festgehalten, um Informationen über den Pflanzenaufbau zu erhalten (Abschnitt 5.2).

4.1.5 Transmissions- und Attenuationsmessungen

Innerhalb des Modell sollte die Verfügbarkeit von Kohlenstoffverbindungen, die für das Wachstum und die Energieversorgung der Pflanzen notwendig sind und aus der Photosynthese resultieren, in Abhängigkeit von der Einstrahlung berechnet werden. Die Lichtdurchlässigkeit bzw. der Lichttransmissionsgrad der Blätter ist hinsichtlich der Durchdringung der auf den Bestand auftreffenden Einstrahlung durch das Blattwerk und damit für die Abschätzung der für die Photosynthese der unteren Blätter verfügbaren Lichtmenge von Bedeutung. Um den Transmissionsgrad als Parameter für das Modell zu ermitteln, wurden je Prüfglied des Prüffaktors 'Bewässerungsstrategie' 24 Blätter an verschiedenen Pflanzen ausgewählt und die Einstrahlung im Gewächshaus unter wechselnden Lichtverhältnissen oberhalb und unterhalb der Blattspreite mit einem Handmessgerät LI-250 mit angeschlossenen Quantensensor LI-190SA (LI-COR Inc., Lincoln, USA) gemessen.

Die Abschwächung der auftreffenden Einstrahlung innerhalb eines Bestandes (Lichtattenuation) von oben nach unten ist abhängig von der sich kumulierenden Blattfläche bzw. dem Blattflächenindex in m^2 Blattfläche m^{-2} Boden. Die Berechnung der Lichtattenuation war notwendig, um die Photosyntheseleistung des Pflanzenbestandes im Modell zu berechnen. Um einen Parameter für die Lichtattenuation zu ermitteln, wurden innerhalb des Bestandes unter Gewächshausbedingungen an acht Steinwollmatten mit jeweils vier Pflanzen Messungen der Prüfmerkmale Einstrahlung oberhalb und unterhalb der Blätter an vier Stellen pro Pflanze vorgenommen und für jede Pflanze und Steinwollmatte entsprechend gemittelt, um die Messwerte auf einen definierten Abschnitt des Laubdaches beziehen zu können. Durch die Division der Einstrahlungswerte unterhalb des Bestandes durch den Wert oberhalb konnte der Anteil der unterhalb des Laubdaches ankommenden Einstrahlung berechnet werden.

Nach Abschluss der Einstrahlungsmessungen wurden alle Blätter geerntet und die Blattlängen und -breiten gemessen, um die Blattflächen und den Blattflächenindex als Bezugsgrößen für die Lichtattenuation zu bestimmen.

4.2 Gaswechselfmessungen

4.2.1 Messgerät

Alle Gaswechselfmessungen wurden mit einem tragbaren Photosynthese-Messsystem HCM-1000 (Walz GmbH, Effeltrich) durchgeführt. Bei dem HCM-1000 handelte es sich um ein „offenes System“. Kennzeichnend hierfür war, dass Umgebungsluft oder ein aufbereitetes Luftgemisch kontinuierlich angesaugt wurde, die Luft das System durchströmte und anschließend wieder verließ. Das System bestand dabei aus einer Zentraleinheit, die den Infrarot-Gasanalysator BINOS-100/4PS mit zwei Analysenküvetten für die CO_2 - und H_2O -Absolut- und Differenzmessung sowie die Systempumpe und einen Massendurchflussmesser enthielt, und einer Messküvette 1010-M.

Bei der Differenzmessung wurden die CO_2 - und H_2O -Konzentrationsänderungen, die der Gaswechsel des Messobjektes in der Messküvette hervorrief, anhand der Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangskonzentration ermittelt. Die notwendigen Messungen der Grundkonzentrationen der einströmenden Luft mussten vor jeder Messreihe durchgeführt werden und besaßen solange Gültigkeit wie die Grundkon-

zentration gleich blieb. Für Absolutmessungen wurde CO₂- bzw. H₂O-freie Luft zur Bestimmung der Grundkonzentration verwendet. Um CO₂- und H₂O-freie Luft zu erhalten, wurde die Luft durch Absorberröhren mit Natriumcarbonat bzw. Silicagel geleitet. Die für die unterschiedlichen Messvorgänge notwendigen Modifikationen des pneumatischen Luftweges steuerte die Zentraleinheit selbst.

Ein Luftstrom durchspülte während der Messungen ständig die Messküvette. Innerhalb und an der Messküvette befanden sich Sensoren für die Erfassung der Einstrahlung, relativen Luftfeuchtigkeit sowie Küvetten-, Umgebungs- und Blatttemperaturen. Der Sensor zur Messung der Einstrahlung war ein Miniquantensensor zur selektiven PAR-Messung (380-710 nm) mit einem Messbereich von 0 bis 3000 $\mu\text{mol Quanten m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei einer Messgenauigkeit von $\pm 5 \%$. Die relative Luftfeuchtigkeit wurde kapazitiv im Messbereich von 0 bis 100 % und einer Messgenauigkeit von $\pm 2 \%$ gemessen. Die Messungen der Küvetten- und Umgebungstemperaturen erfolgten mit Messelementen Pt 100 $\frac{1}{2}$ DIN, die der Blatttemperatur mit einer Infrarot-Thermosäule im Messbereich von -10 bis +50 °C und einer Messgenauigkeit von $\pm 0,25 \%$. Die Messküvette besaß bei einer Messfläche von 10 cm² ein Küvettenvolumen von 40 cm³. Die Klimatisierung fand über einen Wärmetauscher statt, der mit einem Peltierelement zur Kühlung und Erwärmung verbunden war. Innerhalb der Messküvette sorgte ein Fächerventilator für einen besseren Wärmeaustausch zwischen Wärmetauscher und Luft und laut Angabe des Herstellers für eine Erhöhung der Grenzschichtleitfähigkeit auf über 3000 mmol H₂O m⁻² s⁻¹.

Eine Beeinflussung der relativen Luftfeuchtigkeit wurde über eine Silicagel-Absorberröhre durchgeführt. Dabei strömte eine stufenlos einstellbare Teilmenge des Luftstromes durch die Absorberröhre, um sich dann wieder mit der nicht umgeleiteten Luft zu vereinen und eine entsprechend niedrigere relative Luftfeuchtigkeit anzunehmen.

Die CO₂-Konzentration konnte mit Hilfe einer CO₂-Dosiereinrichtung eingestellt werden. Dabei wurde zuerst die in die Zentraleinheit einströmende Luft in einer Absorberröhre mit Natriumkarbonat von CO₂ befreit und danach in der CO₂-Dosiereinrichtung 1030-D wieder mit reinem CO₂ bis zum eingestellten Sollwert angereichert.

Eine Belichtung des zu untersuchenden Objektes erfolgte mit dem Beleuchtungsaufsatz 1050-H, der sich aus einer Halogenlampe, einem verspiegelten Lichtschacht und der Steuerelektronik zusammensetzte. Die Einstrahlung wurde dabei von einem Mikroquantensensor mit gleicher spektraler Empfindlichkeit wie der der Messküvette innerhalb des Lichtschachtes gemessen. In den Strahlengang konnten Neutralfilter eingeschoben werden, um bei einem einstellbaren Bereich der Lichtintensität von 1 bis 2000 $\mu\text{mol Quanten m}^{-2} \text{s}^{-1}$ Unterschiede im Lichtspektrum auszuschließen.

4.2.2 Messung der apparenten CO₂-Austauschrate

In das Modell sollten die Auswirkungen äußerer Einflussgrößen auf die apparente CO₂-Austauschrate eingebunden werden. Die Umweltparameter, die die Gaswechsellmessungen beeinflussen können und als Prüffaktoren untersucht wurden, waren Temperatur, Licht, CO₂-Konzentration der Luft, Alter der Blätter, Mattenfeuchtigkeit, Leitfähigkeit und Stickstoffgehalt der Mattenlösung sowie relative Luftfeuchtigkeit. Die hinsichtlich des Gaswechsels gemessenen Prüfmerkmale waren die apparenten Netto-CO₂-Austausch- und Transpirationsraten, die Wasserdampfleitfähigkeit sowie das Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft gegenüber dem Blattinneren, die bei jeder Messung des HCM-1000 automatisch berechnet und abgespeichert wurden. Die

Zusammensetzung eines Datensatzes einschließlich weiterer informeller Messwerte wird im Anhang A aufgeführt.

Im Zeitraum von Januar 1997 bis März 1999 wurden an zwölf markierten Beobachtungspflanzen sowie an weiteren Messpflanzen Gaswechsellmessungen unter Berücksichtigung der verschiedenen Prüffaktoren in der Messkuvette vorgenommen, um die Prüfmerkmale des Gaswechsels zu bestimmen.

Bei allen Messungen, bei denen die Einflüsse der Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit nicht Gegenstand der Messungen waren, wurde darauf geachtet, dass diese so ausgerichtet war, dass keine Beeinflussung der Photosyntheseleistung aufgrund von Wasser- oder Nährstoffmangel bzw. -überschuss vorlag. So fanden die folgenden Messreihen, wenn nicht anders angegeben, nur an Pflanzen statt, die mit Überschuss bewässert wurden, so dass den Pflanzen ständig ausreichend Nährlösung in an den Bedarf der Pflanzen angepasster Konzentration zur Verfügung stand.

Bei den folgenden Messungen ermittelte das HCM-1000 im Abstand von fünf Minuten fünf über jeweils 30 s gemittelte Messwertreihen. Jede Messwertreihe bestand dabei aus 22 Werten (Anhang A). Vor der ersten Messung, bei jedem Wechsel des Messobjektes und nach jeder Veränderung der Küvettentemperatur, CO₂-Konzentration, relativen Luftfeuchtigkeit bzw. der Beleuchtungsstärke hielt das HCM-1000 eine Wartezeit von 15 min ein, damit sich das Messobjekt an die geänderten Bedingungen anpassen konnte, bevor eine CO₂-Absolutwertmessung die CO₂-Konzentration der Umgebungsluft und eine Bypassnullpunktmessung den Referenzwert für die Differenzmessung neu bestimmte. Eine Bypassnullpunktmessung bedeutete hierbei, dass die Messung des Referenznullpunkts und der Eingangs-CO₂-Konzentration nicht in der leeren Messkuvette erfolgte, sondern, dass das Messobjekt bei der Reihenmessung in der Kuvette verblieb und der Luftstrom um die Kuvette herum geleitet wurde. Ein Massenflusssensor kontrollierte vor dem Eingang in die Messkuvette den Luftstrom, wobei dieser während aller Blattmessungen auf 1000 cm³ min⁻¹ eingestellt war.

4.2.2.1 Temperatur und Licht

Ziel dieser Messreihe war es, den Einfluss von Temperatur und Licht auf das Prüfmerkmal apparente Netto-CO₂-Austauschrate zu untersuchen. Die Messungen des Gaswechsels wurden an jungen vollentwickelten Blättern an vier der zwölf markierten Pflanzen durchgeführt und fanden mit der Kuvette an der Blattspitze statt, da diese Stelle des Blattes am empfindlichsten auf Veränderungen der Umgebungseinflüsse reagiert (MATSCHE und RICHTER, 1998). Prüffaktoren der Messungen waren die Küvettentemperatur und die Belichtung des Blattausschnittes. Die Küvetten-temperatur betrug dynamisch in Zweigradschritten gesteigert zwischen 6 und 30 °C. Die Belichtung des Blattausschnittes regelte das HCM-1000 über den Beleuchtungs-aufsatz 1050-H in den Stufen 2, 5, 10, 21, 55, 112, 169, 226, 282 und 339 W m⁻² s⁻¹ PAR (tatsächlich gemessene Werte).

Konstantfaktoren waren die CO₂-Konzentration und das Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft, wobei die Messwerte beider Faktoren aufgrund der Einflüsse der Umgebungsbedingungen schwankten. Die CO₂-Konzentration in der Messkuvette folgte der Umgebungsluft, die in drei Metern Höhe über dem Bestand mit Hilfe einer Lanze angesaugt wurde. Sie betrug im Mittel 7,59E-04 kg CO₂ m⁻³ (412 ppm). Das Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft konnte nur indirekt über die Entfeuchtungsregelung des HCM-1000 eingestellt werden und lag zwischen 7,0 und 17,3 Pa kPa⁻¹. Das HCM-1000 erfasste ebenfalls die Messwerte der CO₂-Konzentration und des

Wasserdampfsättigungsdefizites und ordnete sie den entsprechenden Datensätzen zu.

4.2.2.2 CO₂

Zur Bestimmung des Einflusses des Prüffaktors CO₂-Konzentration der Luft auf das Prüfmerkmal der apparenten Netto-CO₂-Austauschrate wurde bei den Messungen mit Hilfe der Dosiereinrichtung 1030-D der CO₂-Gehalt am Eingang der Messkuvette auf 2,24E-04, 6,21E-04, 1,00E-03, 1,56E-03, 2,31E-03, 3,04E-03 und 3,73E-03 kg CO₂ m⁻³ (125, 340, 550, 850, 1260, 1660 und 2050 ppm) eingestellt. Zudem variierte als weiterer Prüffaktor die Einstrahlung in den Werten 21, 180 und 339 W m⁻² s⁻¹ PAR. Der Küvettentemperatursollwert als Konstantfaktor war mit 20 °C vorgegeben. Der Wasserdampfsättigungsdefizit lag in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen zwischen 9,5 und 16,7 Pa kPa⁻¹.

Abweichend von den zuvor beschriebenen Messreihen fanden an allen zwölf markierten Pflanzen Messungen an BlätterN, die vollentwickelt waren aber noch keine Alterungserscheinungen zeigten, statt.

4.2.2.3 Blattalter

Eine weitere Einflussgröße auf die Photosyntheseleistung der Blätter ist deren Blattalter. Ziel dieser Messreihe war es, die Abhängigkeit des Prüfmerkmals der apparenten Netto-CO₂-Austauschrate vom Alter des entsprechenden Blattes als Messobjekt zu untersuchen und gegebenenfalls eine Beziehung abzuleiten.

Im Gegensatz zur vorangegangenen Messreihe wurden als Prüffaktor Blätter verschiedenen Alters gemessen, um den Einfluss des Blattalters auf die apparente Netto-CO₂-Austauschrate zu erfassen. Die CO₂-Konzentration am Eingang der Messkuvette der Konzentration entsprach der Umgebungsluft und betrug als Konstantfaktor im Mittel 7,13E-04 kg CO₂ m⁻³ (389 ppm). Die Steuerung des Wasserdampfsättigungsdefizites der Luft erfolgte über die Entfeuchtungsregelung des HCM-1000 und lag in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen zwischen 8,5 und 20,2 Pa kPa⁻¹.

In dieser Messreihe wurde die Küvettentemperatur als zweiter Prüffaktor mit den Sollwerten 10, 20 und 30 °C variiert und jeweils mit einem dritten Prüffaktor, der Einstrahlungsstärke, in den Werten 2, 21 und 226 W m⁻² s⁻¹ PAR kombiniert. Insgesamt fanden die Messungen an acht Pflanzen statt, wobei von jeder Pflanze ein junges, sich noch in der Blattentwicklung befindliches Blatt und ein altes, sich bereits verfärbendes Blatt ausgewählt wurde. Das Alter der Blätter konnte aufgrund der Aufzeichnungen bei den Pflanzenbeobachtungen (Abschnitt 4.1.4) vorgenommen werden.

4.2.2.4 Leitfähigkeitswert und Stickstoffgehalt der Mattenlösung

Ziel dieser Messreihe war es, den Einfluss der Prüffaktoren Stickstoffgehalt und Leitfähigkeit der in der Steinwollmatte vorhandenen Nährlösung auf die apparente Netto-CO₂-Austauschrate als Prüfmerkmal zu untersuchen. In dieser Versuchsreihe erfolgte die Variation des Prüffaktors Leitfähigkeit ohne Verschiebung der Nährstoffverhältnisse in der Nährlösung, so dass bei Verwendung von salzarmem Gießwasser von einem starken Zusammenhang zwischen beiden Einflussgrößen ausgegangen werden konnte.

Die Messungen fanden an Pflanzen statt, deren Mattennährlösung ständig durch hohe Überschussbewässerungsgaben ausgetauscht wurde, da die Leitfähigkeit wäh-

rend der Messungen möglichst konstant bleiben sollte. Um ausreichende Drainwassermengen zu gewährleisten und die Pflanzen für die Messungen mit unterschiedlich konzentrierten Nährlösungen versorgen zu können, wurden zwei Steinwollmatten mit jeweils vier Pflanzen vom vorhandenen Bewässerungssystem abgekoppelt und an einen eigenen Bewässerungskreislauf angeschlossen. Der Nährlösungsvorratstank fasste dabei nur 30 l Nährlösung, so dass ein Austausch der Nährlösung bei Veränderung der Leitfähigkeit problemlos möglich war. Je Leitfähigkeitswert bzw. Stickstoffgehaltsstufe erfolgten die Messungen an vier Pflanzen jeweils an vollentwickelten Blättern. Die Stickstoffversorgung erfolgte nur in Form von Nitrat-Stickstoff, so dass im weiteren der Nitratgehalt angegeben wird.

Die Variation des Prüffaktors Leitfähigkeit der Mattenlösung wurde durch eine Erhöhung der Nährlösungskonzentration erreicht. Zusätzlich zu den Leitfähigkeitsabstufungen fand eine Messreihe mit Leitungswasser der Stadtwerke Münster ohne Zugabe von Nährstoffen statt. Die entsprechenden Leitfähigkeits- und pH-Werte sowie die Nitratgehalte der Tropf- und Mattenlösungen sind in Tab. 2 aufgeführt. Die Messung der Leitfähigkeits- und pH-Werte wurde mit Handmessgeräten vorgenommen (WTW LF 318, WTW pH 330, beide WTW GmbH, Weilheim). Die Nitratgehalte beruhten auf Messdaten, die ein Reflektometer Rqflex 2 (Merck KGaA, Darmstadt) zur elektronischen Auswertung der Farbskala von Merck-Reflectoquant Nitrat-Messstäbchen ermittelte. Jeder Messwert stellte einen Mittelwert aus vier Wiederholungen dar.

Tab. 2: Leitfähigkeits- und pH-Werte sowie Nitratgehalte in den Tropf- und Mattenlösungen in der Versuchsreihe zur Überprüfung des Einflusses der Leitfähigkeit und des Nitratgehaltes in der Mattenlösung auf die apparente Netto-CO₂-Austauschrate von *Gerbera jamesonii* 'Moana'.

Messreihe	Wasser	Tropflösung			Mattenlösung		
		Leitfähigkeit [mS cm ⁻¹]	pH-Wert	Nitratgehalt [mg l ⁻¹]	Leitfähigkeit [mS cm ⁻¹]	pH-Wert	Nitratgehalt [mg l ⁻¹]
1	Leitungswasser	0,5	7,0	12	0,5	6,9	10
2	Regenwasser	0,8	5,6	340	1,5	5,8	180
3	Regenwasser	1,9	5,6	809	2,0	5,6	816
4	Regenwasser	2,4	5,6	1022	2,8	5,9	1136
5	Regenwasser	3,2	5,6	1362	3,0	5,5	1180

Während einer Messreihe wurde mittels der Dosiereinrichtung 1030-D der CO₂-Gehalt am Eingang der Messküvette als weiterer Prüffaktor von 6,36E-04 kg CO₂ m⁻³ auf 1,57E-03 kg CO₂ m⁻³ und 2,83E-03 kg CO₂ m⁻³ (347, 861 und 1543 ppm) gesteigert. Die Einstrahlung variierte als dritter Prüffaktor in den Werten 10, 55, 112, 169, 226 und 339 W m⁻² s⁻¹ PAR. Der Sollwert der Küvettentemperatur war als Konstantfaktor bei 20 °C eingestellt. Das Wasserdampf-sättigungsdefizit lag zwischen 7,4 und 18,9 Pa kPa⁻¹. Bevor die Messungen mit dem HCM-1000 begannen, erhielten die Messpflanzen nach Einstellung einer neuen Nährlösung eine Woche Zeit, um sich an die veränderten Leitfähigkeiten und Nitratgehalte anzupassen.

4.2.2.5 relative Luftfeuchtigkeit

Der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf die apparente Netto-CO₂-Austauschrate und die Transpiration erfolgt indirekt. In Abhängigkeit der Temperatur und des Druckes wirkt sich die relative Luftfeuchtigkeit auf das Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft gegenüber den interzellulären Lufträumen in den Blättern aus (ALVPD [Pa kPa⁻¹] = air to leaf vapour pressure deficit). Ziel dieser Messreihe war es, an jungen vollentwickelten Blättern mit dem HCM-1000 Messungen zur Überprüfung der Auswirkung des Prüffaktors relative Luftfeuchtigkeit auf die Prüfmerkmale apparente Netto-CO₂-Austausch- und Transpirationsrate durchzuführen. Aus unterschiedlichen Einstellungen des Regelventils zur Luftfeuchtere regulierung resultierten bei Temperatursollwerteinstellungen von 10, 20 und 30 °C als zweiter Prüffaktor, einer mittleren CO₂-Konzentration der Eingangsluft von 6,36E-04 kg CO₂ m⁻³ (348 ppm) und einer Einstrahlungsstärke von 113 W m⁻² s⁻¹ PAR als Konstantfaktoren verschiedene relative Luftfeuchtigkeiten. Das Ventil war dabei entweder ganz geöffnet, geschlossen oder auf eine Mittelstellung eingestellt, so dass relative Luftfeuchtigkeiten zwischen 10 und 90 % erreicht wurden. Die Bewässerung der Pflanzen war so ausgelegt, dass jederzeit genügend Nährlösung zur Verfügung stand, um einen möglichst hohen Turgor innerhalb der Blattzellen aufrecht zu halten.

Aus den erfassten Messwerten der Temperatur, relativen Luftfeuchtigkeit und des Druckes errechnete das HCM-1000 während der Messungen als weitere Prüfmerkmale das ALVPD und die Wasserdampfleitfähigkeit der Spaltöffnungen ch_2O [mmol kg⁻¹ s⁻¹]. Die Grenzschichtleitfähigkeit blieb unberücksichtigt, da aufgrund des vibrierenden Fächers innerhalb der Küvette diese soweit erhöht wurde, dass sie keinen limitierenden Faktor darstellte (von Willert et al., 1995; Walker, 1997).

4.2.2.6 Mattenfeuchtigkeit

Nach Analyse der Prüffaktoren des Klimas und der Nährstoffversorgung war es Ziel dieser Messreihe, den Prüffaktor Wasserverfügbarkeit in der Steinwollmatte hinsichtlich der Auswirkung auf die Prüfmerkmale der apparenten Netto-CO₂-Austausch- und Transpirationsraten sowie der Wasserdampfleitfähigkeit zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde die Küvette des HCM-1000 an ein vollentwickeltes Blatt befestigt und die Klimabedingungen als Konstantfaktoren bei 20 °C Küvetten-temperatur, 226 W m⁻² s⁻¹ PAR künstliche Belichtung und 7,84E-04 kg CO₂ m⁻³ (429 ppm) CO₂-Konzentration der Luft eingestellt. Das Wasserdampfsättigungsdefizit erreichte Werte von 6,9 bis 20,6 Pa kPa⁻¹. Während der Messungen fand keine Bewässerung statt. Die Messungen dauerten in Abhängigkeit vom Wasserverbrauch der Messpflanzen bis zu drei Tage und wurden zweimal wiederholt.

Die Messung der Feuchtigkeit in den Steinwollmatten erfolgte indirekt über die Saugspannung mittels Analog-Druckaufnehmertensiometer Typ T3 (UMS GmbH, München), wobei pro Beet ein Tensiometer installiert war. Die Erfassung der Ausgangssignale der Tensiometer führte eine PC-gesteuerte Ein- und Ausgabereinheit für analoge Signale und/oder digitale Daten und Zustandsgrößen MDP 8280 durch (Datalog GmbH, Mönchengladbach). Die Ausgangssignale lagen in mV-Werten vor, die nach der Datenerfassung auf dem PC mittels der Steuersoftware Softgraph (Datalog GmbH, Mönchengladbach) gespeichert wurden, bevor diese nach Übertragung auf einen anderen PC mit Hilfe der zu den entsprechenden Tensiometern gehörigen Kalibrierwerten in hPa-Werte umgerechnet werden konnten.

Die Messdatenerfassung der Prüfmerkmale und der Saugspannung fand im Abstand von jeweils fünf Minuten statt, so dass es möglich war, beide Messwertreihen über die Zeitaufzeichnung aneinander anzupassen und in Beziehung zu setzen.

4.2.3 Messanordnung zur Bestimmung der Wurzelatmung

Neben den Messungen der apparenten Netto-CO₂-Austauschrate mussten als Voraussetzung für die Erstellung des Modells die Prüfmerkmale Wurzelatmung und Stickstoffaufnahme in Verbindung mit den Prüffaktoren Wurzelraumtemperatur und Nährlösungskonzentration untersucht werden.

Für diese Messreihe konnten die Pflanzen nicht direkt aus dem Kultursystem entnommen werden, da bei der Auslösung der Pflanzen aus den Steinwollmatten zum einen Wurzeln beschädigt und zum anderen die Pflanzen zu groß für die Messeinrichtung gewesen wären. Zudem wäre es schwierig gewesen, die Steinwollreste zwischen den Wurzeln restlos zu entfernen, um Wechselwirkungen mit auf der Steinwolle lebenden Mikroorganismen zu vermeiden.

Drei Monate vor Beginn der ersten Messreihe wurden Gerberapflanzen aus dem System entnommen und geteilt. Jedes Teilstück behielt ausreichend Wurzel- und Blattmasse, um eine schnelle Wiederaufnahme des Pflanzenwachstums zu gewährleisten. Die geteilten Pflanzen steckten mit dem Wurzelhals in 5 cm langen PVC-Rohrstücken mit einem Innendurchmesser von 32 mm, so dass die Blätter und Blütenanlagen an der Oberkante des Rohrstückes zu finden waren. Die so vorbereiteten Teilpflanzen wurden in 12 cm Kunststofftöpfe in Seramis (Effem GmbH, Verden) getopft und zusammen mit den Gerberapflanzen in Steinwollmatten in der gleichen Gewächshauszelle weiterkultiviert. Die Pflanzen erhielten die Bewässerungsdüngung über einen Tropfer.

Eine Woche vor den Messungen wurden die Pflanzen, die inzwischen ausreichend neue Wurzeln und Blattmasse gebildet hatten, ausgetopft und das Seramis von den Wurzeln entfernt. Die obere Öffnung des Rohrstückes erhielt vor dem Einspannen der Pflanzen in den Deckel der Messeinrichtung eine luftdichte Versiegelung mit einer wasserlöslichen elastischen Farbformulierung (Window Color, Marabuwerke GmbH & Co., Tamm). Bis zum Beginn der Messung hatten die Pflanzen die Möglichkeit, sich an die Wachstumsbedingungen in der Messeinrichtung zu gewöhnen. Während dieser Gewöhnungsphase betrug die Leitfähigkeit der Nährlösung im Glas 0,8 mS cm⁻¹. Kurz vor Messbeginn erfolgte eine Minute lang eine Desinfektion der Wurzeloberflächen in einer 0,1 prozentigen Chinosol W-Lösung (Wirkstoff: 8-Hydroxychinolinsulfat kombiniert mit Kaliumsulfat, Hoechst, Frankfurt am Main), um einen Einfluss mikrobieller Atmung auf die Messwerte des Gaswechsels zu vermeiden (BLANKE, 1995).

In der Messanordnung fand das HCM-1000 in veränderter Konfiguration Verwendung (Abb. 9). Die klimatisierbare Messküvette wurde durch einen Glaszylinder mit einem Volumen von 1 l bei einer Höhe von 15 cm ergänzt, in den die Wurzeln der zu messenden Gerberapflanze hineinreichten. Den Glaszylinder verschloss ein zweiteiliger Deckel aus Acrylglas, in welchen das Messobjekt mit Hilfe von Schraubzwingen eingespannt wurde. Für ein luftdichtes Abschießen des Deckels auf dem Glaszylinder sorgten Schaumstoffdichtungen und eine Einspannvorrichtung aus Aluminium in Verbindung mit Spannschrauben. In den Deckel waren je ein Luftein- und -auslass eingearbeitet. Im Glaszylinder befand sich während der Messungen ein elektronischer Thermo-Hygrograph MDL 2000-2 (Stelzner Agrar-Fachberatungsgesellschaft mbH, Nürnberg), der die Wurzelraumtemperatur in Abständen von zehn Minuten

selbsttätig aufzeichnete. Die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit war dabei nicht aktiviert.

Die Wurzelraumtemperatur als Prüffaktor folgte der Temperatur der umgebenden Raumluft. Temperaturen über 20 °C konnten nur mit Hilfe eines Wasserbades realisiert werden, in welches der Glaszylinder mit der gesamten Einspannvorrichtung hineingestellt wurde. Die Erwärmung des Wassers übernahm ein Thermostat gesteuerter Aquarienheizstab Visi-Therm (Aquarium Systems, Mentor, USA) (Abb. 9).

Bevor der Luftstrom aus der Zentraleinheit des HCM-1000 mit einer Strömungsgeschwindigkeit von $600 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ in die leere Messküvette geleitet wurde, erfolgte eine Trocknung der Luft bei geöffnetem Entfeuchtungsventil. Die Messküvette befand sich in der Messanordnung, um die äußeren Temperatur- und Einstrahlungsbedingungen festhalten zu können.

Im Anschluss an die Messküvette reihte sich der Glaszylinder mit dem Messobjekt in die Anordnung ein. Die einströmende Luft strich an den Wurzeln der Gerbera vorbei bevor sie über die Auslassöffnung zu einem Sintermetallwasserabscheider geleitet wurde, um ein Auskondensieren von Wasser aus der Luft im HCM-1000 bei vorhandenen Temperaturdifferenzen zu verhindern. Die Differenzmessung des CO_2 -Gaswechsels und die Berechnung der Messdaten fanden im HCM-1000 wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben statt.

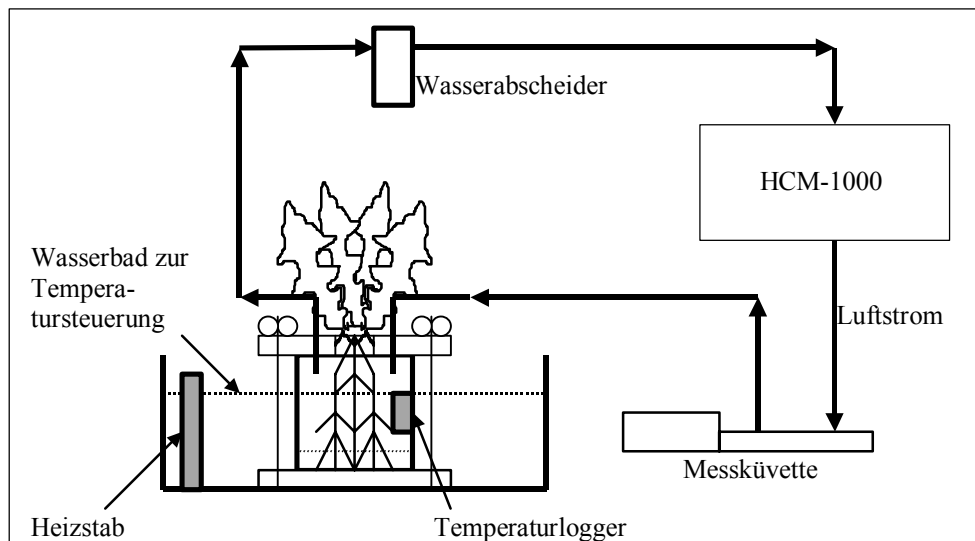


Abb. 9: Skizze des Messaufbaus zur Bestimmung der Wurzelatmung unter Einbeziehung des Gaswechselmessgerätes HCM-1000.

Damit die Wurzeln im Glas nicht austrockneten und Wassermangel den Gaswechsel der oberirdischen Pflanzenteile nicht behinderte, war der Glaszylinder mit circa 250 cm^3 Wasser gefüllt, so dass die Wurzelenden hineinreichen konnten. Die genaue Menge des eingefüllten Wassers wurde durch Wägungen ermittelt. Eine Aufdüngung des Wassers in den verschiedenen Nährlösungskonzentrationsvarianten geschah über die Zugabe von zwei Stammlösungen, wie in Tab. 1, jedoch ohne Ammoniumnitrat, um die angestrebten Leitfähigkeiten zu erhalten. Die Messungen der Leitfähigkeit erfolgten mit dem Handmessgerät, die des Nitratgehaltes reflektometrisch. Eine Auflistung der verschiedenen Nährlösungen mit den entsprechenden Prüffaktoren Leitfähigkeit, Nitratgehalt und Wurzelraumtemperatur wird in Tab. 3 wiedergegeben. Jede Messreihe dauerte pro Nährlösungskonzentration und Temperatur 24 Stunden, um den Einfluss der Einstrahlungsmenge auf das Prüfmerkmal Wurzelatmung bestimmen zu können. Im hohen Temperaturbereich über 20 °C tra-

ten zum Teil trotz Verwendung eines Wasserabscheiders Messungenauigkeiten aufgrund von Kondenswasserwasserbildung vor dem Eingang in die Zentraleinheit des HCM-1000 auf, so dass einige Messergebnisse nicht verwendet wurden. In Tab. 3 werden nur die Messreihen aufgeführt, bei denen keine Kondensationsprobleme auftraten, so dass die Anzahl an verwertbaren Messungen bei Temperaturen über 20 °C reduziert war.

Tab. 3: Leitfähigkeitswerte und NO₃-Gehalte der Nährlösungen, die bei der Versuchsreihe zur Ermittlung der Wurzelatmung von *Gerbera jamesonii* 'Moana' während der Gaswechsellmessungen verwendet wurden.

Leitfähigkeit	NO ₃ -Gehalt	Temperatur im Wurzelraum
mS cm ⁻¹	mg l ⁻¹	°C
0,04	10	18,8
0,04	11	17,8
0,04	10	18,5
0,64	14	18,1
0,65	16	24,8
0,84	352	18,4
0,86	312	16,0
0,81	289	30,0
0,85	271	30,1
1,58	656	18,9
1,61	587	15,7
1,59	562	21,6
2,42	1040	17,0
2,45	912	17,5
2,41	934	26,1
3,22	1304	18,3
3,25	1488	15,6
3,21	1178	26,5

Nach Abschluss der Messungen an einer Pflanze wurden die Wurzeln abgeschnitten und getrocknet, um die Trockensubstanz zu bestimmen und die Atmungswerte darauf beziehen zu können.

Für die Messungen der Wurzelatmung standen acht Pflanzen zur Verfügung. An einer einzelnen Pflanze konnten nicht alle Nährlösungskonzentrations-Temperatur-Kombinationen untersucht werden. Nach drei Messreihen mit jeweils anderen Kombinationen von Nährlösungskonzentration und Temperatur mussten die Pflanzen ausgetauscht werden, da das Wurzelwachstum die Messergebnisse ansonsten über die ermittelte Trockensubstanz verfälscht hätte. Die Zunahme der Trockensubstanz über bis zu drei Messtage wurde vernachlässigt, so dass bei drei aufeinanderfolgenden Messtagen an einer Pflanze die am Ende ermittelte Trockensubstanz für alle drei Messreihen als Basiswert der Atmungsmessung herangezogen wurde. Die Daten aller Messreihen wurden in einer multiplen Regressionsanalyse hinsichtlich der Einflüsse der Prüffaktoren Nährlösungskonzentration und Temperatur auf die Prüfmerkmale Wurzelatmung und Stickstoffaufnahme hin analysiert.

Eine annähernde Bestimmung des Gehaltes an löslichen Kohlenhydraten, deren Ergebnis in den Modellberechnungen benötigt wurde, führte die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Münster durch (VDLUFA, 1991). Bei der verwendeten Methode wurden die Kohlenhydrate in Wasser gelöst. Danach wurde die Lösung mit Bariumphosphat ausgefällt, in einem aliquoten Teil der Trockenrückstand bestimmt und anschließend verascht. Der dabei eingetretende Glühverlust entsprach dem Gehalt an löslichen Kohlenhydraten.

4.3 Verwendete Software

Alle Daten, die das HCM-1000 oder die Datenaufzeichnungsgeräte erfassten, wurden auf einem PC gesammelt und mit der Software Microsoft Excel 5.0 (Microsoft Corporation, Redmond, USA) gesichtet sowie tabellarisch und grafisch aufbereitet. Zum Teil mussten die Daten aus Gründen der Einheitlichkeit in andere Einheiten umgerechnet werden. Die umgerechneten Einheiten und die entsprechenden Umrechnungsfaktoren werden im Anhang B aufgeführt.

Die statistische Verrechnung von Daten geschah mit den Programmen StatView 5.0 (SAS Institute Inc., Cary, USA) und SPSS 3.01 (SPSS GmbH Software, München). Dabei fand StatView bei Häufigkeitsverteilungen und einfachen linearen Regressionen Anwendung, wogegen SPSS hauptsächlich bei der Anpassung multipler nicht-linearer Regressionsgleichungen verwendet wurde.

Die Erstellung des Modells sowie die Integration der Differentialgleichungen, die für die Funktion des Simulationsmodells notwendig waren, erfolgte mit der Modellierungssoftware ModelMaker 3.03 (Cherwell Scientific Publishing Ltd., Oxford, GB). Alle Differentialgleichungen wurden numerisch ausgewertet. Vor einem Modelldurchlauf konnten verschiedene Integrationsmethoden für die Berechnung der Differentialgleichungen ausgewählt werden. Als Methode fand die von ModelMaker vorgeschlagene Runge-Kutta-Methode vierter Ordnung Verwendung, da sie für die numerische Auswertung komplexer Differentiale unter Berücksichtigung diskontinuierlicher Basisdaten, wie sie aus den Aufzeichnungen von Klimadaten resultierten, am besten geeignet war (WALKER, 1997).

Im folgenden angegebene Modelldiagramme wurden aus ModelMaker übernommen. Die Bedeutungen der verwendeten Symbole werden im Anhang F erläutert. Alle in den Modelldiagrammen verwendeten Abkürzungen für eingebundene Variablen werden im entsprechenden Textteil erklärt und in der Übersicht im Anhang C aufgeführt.

Die Fähigkeit des Modells, das Wachstum der Gerbera zu simulieren, wurde anhand der beobachteten Wachstumsdaten überprüft. Berechnungen der Bestimmtheitsmaße schlossen sich an, um bestimmen zu können, wie gut das Modell die Varianz der beobachteten Daten wiedergab.

Zur Optimierung von eingesetzten Parametern stellte ModelMaker die Marquardt-Berechnungsroutine zur Verfügung, die nach WALKER (1997) die geeignetste für die Anpassungen an nicht-lineare Gleichungssysteme war.

5 Ergebnisse

5.1 Blattflächenzuwachs

Anhand der Wachstumsbeobachtungen des ersten Kulturjahres der *Gerbera jamesonii* 'Moana' konnten Informationen über den Zuwachs der Gesamtblattfläche gewonnen werden. Der zeitliche Verlauf der mittleren Blattflächenentwicklung für die drei Bewässerungsprüfglieder ist Abb. 10 zu entnehmen. Allen gemeinsam war der anfängliche Anstieg der Blattfläche während des Spätsommers und die anschließende Stagnation des Blattflächenzugewinns während der lichtarmen Jahreszeit mit einem weiteren schnellen Anstieg der Gesamtblattfläche ab März des folgenden Jahres.

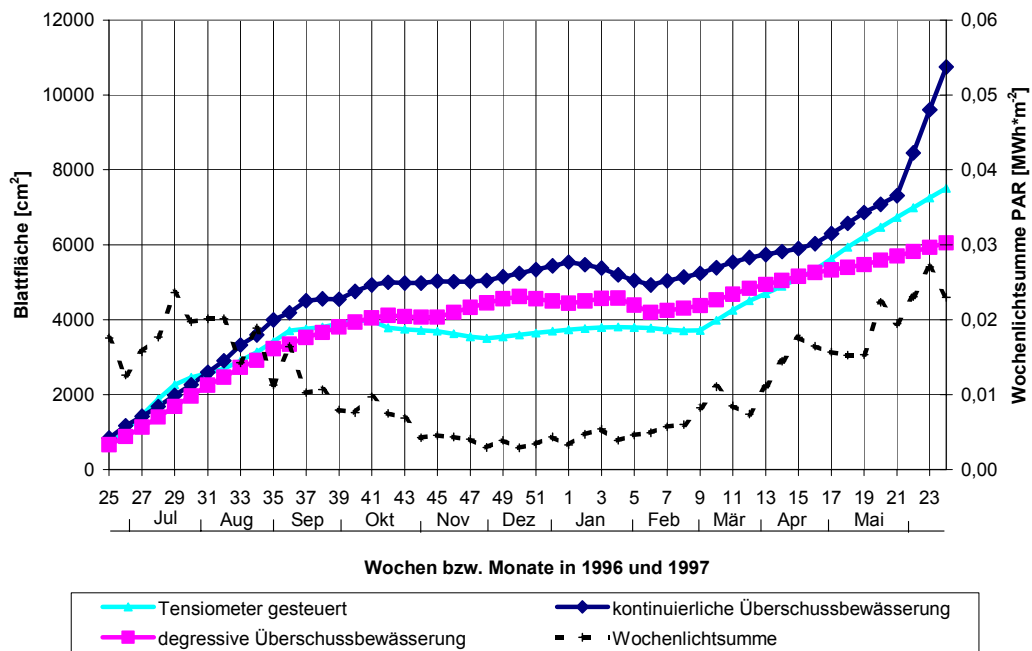


Abb. 10: Blattflächenentwicklung je Pflanze und Wochenlichtsumme während der Wachstumsbeobachtungen an *Gerbera jamesonii* 'Moana' in Abhängigkeit von den Bewässerungsprüfgliedern.

Neben dem zeitlichen Verlauf der Blattflächenentwicklung wurde die Verteilung der Blätter hinsichtlich des Blattalters untersucht. In den Abb. 11, 12 und 13 wird die Verteilung der Blätter entsprechend der Blattaltersklassen für die drei Bewässerungsprüfglieder wiedergegeben. Die Verteilungen wiesen mehrere Maxima auf. Jedes Maximum stand für einen Zeitraum, in dem aufgrund günstiger Wachstumsbedingungen ein erhöhter Blattzuwachs zu beobachten war. Auftretende Maxima verschoben sich mit zunehmender Zeit innerhalb der Alterskategorien in die älteren Klassen nach rechts. Die Erhöhung eines Maximums mit der Zeit entsprach einer weiteren Zunahme an Blättern unter günstigen Kulturbedingungen, wie es im Zeitraum vom 20.06.1996 bis 16.07.1996 deutlich wurde, wogegen sich in einer Abnahme der Blattanzahl die Alterung und damit die zunehmende Absterberate der Blätter widerspiegelte.

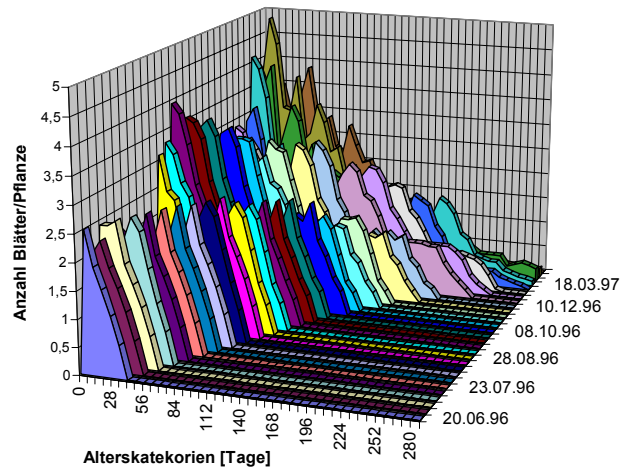


Abb. 11: Blattalter-Häufigkeitsverteilung innerhalb des Bewässerungsprüfgebietes mit Tensiomat gesteuerte Bewässerung während des Zeitraumes der Wachstumsbeobachtungen.

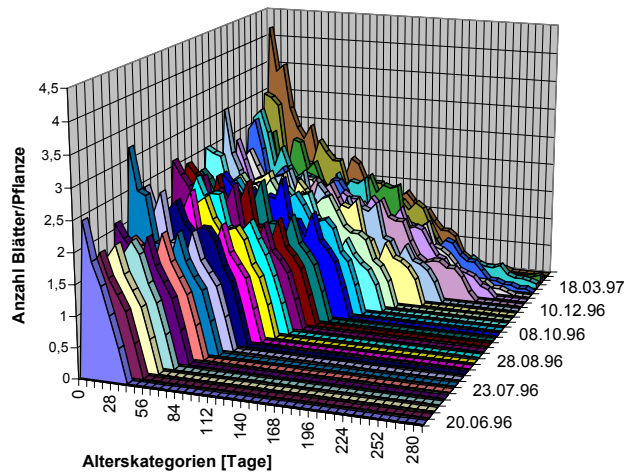


Abb. 12: Blattalter-Häufigkeitsverteilung innerhalb des Bewässerungsprüfgebietes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung während des Zeitraumes der Wachstumsbeobachtungen.

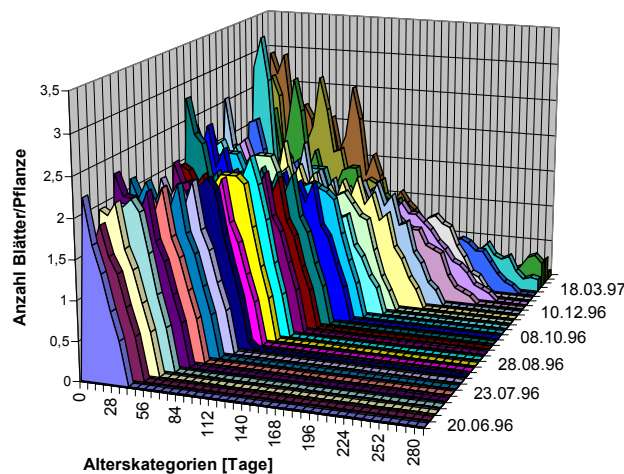


Abb. 13: Blattalter-Häufigkeitsverteilung innerhalb des Bewässerungsprüfgebietes mit degressiv abnehmender Überschussbewässerung während des Zeitraumes der Wachstumsbeobachtungen.

5.2 Blattverteilung

Ein Ziel der Wachstumsbeobachtungen war, Einblick in die räumliche Anordnung der Blätter zu erhalten, um Rückschlüsse auf die Lichtabsorption des Bestandes ziehen zu können. Bei Betrachtung der Blattwinkel der Blattstiele über bzw. unter der Horizontalen, wurde bei allen drei Bewässerungsvarianten deutlich, dass in den Bereichen -20 bis 10 Grad und 50 bis 70 Grad die meisten Blattflächen zu finden waren (Abb. 14). Eine Schichtung der Blattflächen übereinander war erkennbar, was bedeutete, dass Blätter im oberen Bereich des Blattdaches die darunterliegenden schattierten und diese somit nur einen geringen Anteil der auf den Bestand treffenden Einstrahlung erhielten.

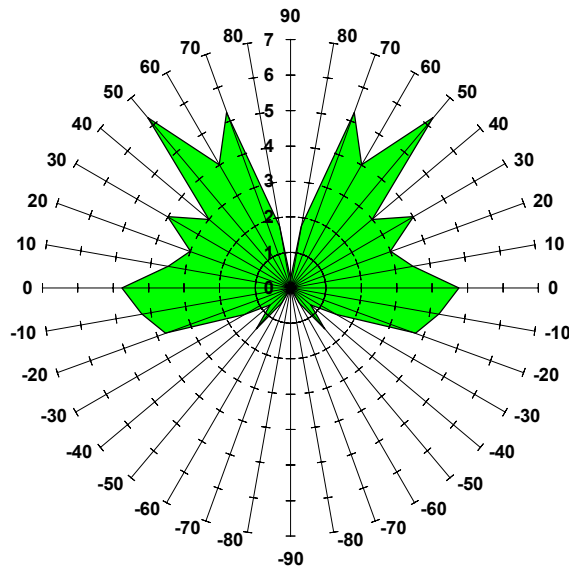


Abb. 14: Blattwinkel-Häufigkeitsverteilung am Beispiel einer einjährigen Gerberapflanze des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung am 02.06.1997. Die Werte sind als Anzahl Blätter je Pflanze angegeben. Die Grafik ist vertikal gespiegelt, so dass sich die tatsächliche Anzahl der Blätter auf eine Hälfte der Darstellung bezieht.

Die Winkel der Blätter erwiesen sich als abhängig vom Blattnalter. Junge Blätter strebten in ihrem Wachstum in einem steilen Winkel nach oben in Richtung Licht (Abb. 15). Mit zunehmender Blattfläche erhöhte sich das Gewicht des Blattes, wobei es durch die Schwerkraft nach unten gezogen wurde und der Blattwinkel abnahm. Je älter das Blatt, umso geringer war der Blattwinkel, zudem drängten jüngere Blätter die älteren nach unten. Absterbende und abgestorbene Blätter hingen in negativen Winkeln herunter.

Abb. 15 gibt einen Hinweis darauf, dass jüngere Blätter bis zu einem Blattnalter von 50 Tagen aktives Blattwachstum und im Mittel Blattstellungen mit Winkeln über 30 Grad zeigten. Voll ausgewachsene Blätter wiesen bis zu einem Alter von 100 Tagen noch Blattwinkel zwischen 15 und 30 Grad auf, wogegen ältere Blätter Blattwinkel unter 10 Grad einnahmen.

Die Richtung des Blattflächenwachstums konnte aus der Verteilung der Blattflächen in einem Richtungsraasterdiagramm ersehen werden (Abb. 16). Die Blätter wuchsen zwar verteilt in alle Richtungen, jedoch lagen die bevorzugten Richtungen im Uhrzeigersinn bei 3 und 9. Aufgrund der Beetanordnung in Nord- (6)/Südrichtung (12) erkannte man, dass die Blätter eher in den freien Raum neben die Pflanzreihe hineinwuchsen als in die Richtungen in denen andere Pflanzen anschlossen, um das vorhandene Licht besser ausnutzen zu können.

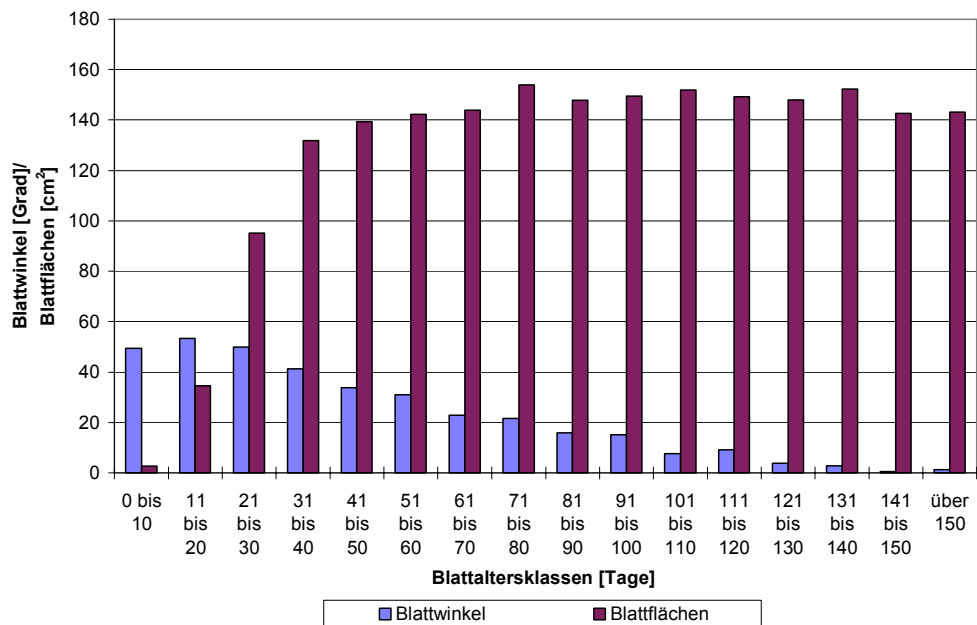


Abb. 15: Blattwinkel und Blattflächen einzelner Blätter von *Gerbera jamesonii* 'Moana' in Abhängigkeit vom Blattalters gemittelt über Pflanzen aller Bewässerungsprüfglieder am Ende der Wachstumsbeobachtungen am 02.06.1997.

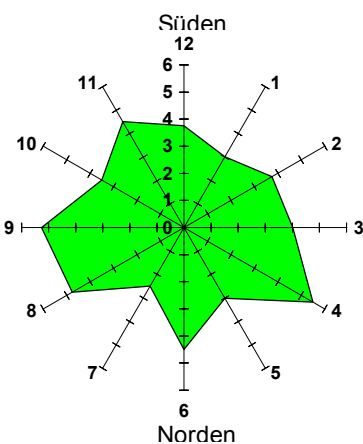


Abb. 16: Blattrichtung-Häufigkeitsverteilung am Beispiel einer einjährigen Gerberapflanze des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung am 02.06.1997. Die Werte sind als Anzahl Blätter je Pflanze der Richtung nach im Uhrzeigersinn angegeben.

5.3 Pflanzenstruktur

Aus den Daten des Blatt- und Blütenwachstums resultierte eine grafische Auswertung des oberirdischen Pflanzenwachstums nach LEFFRING (1981). In Abb. 17 wird eine Beispieelpflanze anhand berechneter Mittelwerte für die Blatt- und Blütenentwicklung dargestellt. Dabei werden die Blätter durch grüne Ellipsen, die Blumen durch rosa Kreisflächen und die Triebe durch Striche wiedergegeben.

Bei der Blattflächenermittlung erhielten die Vegetationspunkte am Ende der entsprechenden Triebe eine Kennzeichnung, so dass Blätter und Blumen diesen zugeordnet werden konnten. LEFFRING (1981) beschrieb aufgrund ihrer Beobachtungen an der Sprossachse der Gerbera, dass am Vegetationspunkt des Haupttriebes nach

Bildung einer bestimmten Anzahl an Blättern zumeist zwei Blumen beinahe zeitgleich ausgebildet wurden, während sich unterhalb des letzten Blattes in der vorletzten Blattachsel ein neuer vegetativer Trieb entwickelte, der die sympodiale Fortsetzung der Hauptwachstumsachse darstellte. Zusätzlich entstanden neue Vegetationspunkte in den Blattachseln älterer Blätter und bildeten weitere zunächst vegetativ wachsende Seitentriebe aus. Nach Ausbildung einer Anzahl an Blättern entwickelten sich an den Vegetationspunkten mehrere Blumen nacheinander, während das vegetative Wachstum an der Verzweigung weitergeführt wurde.

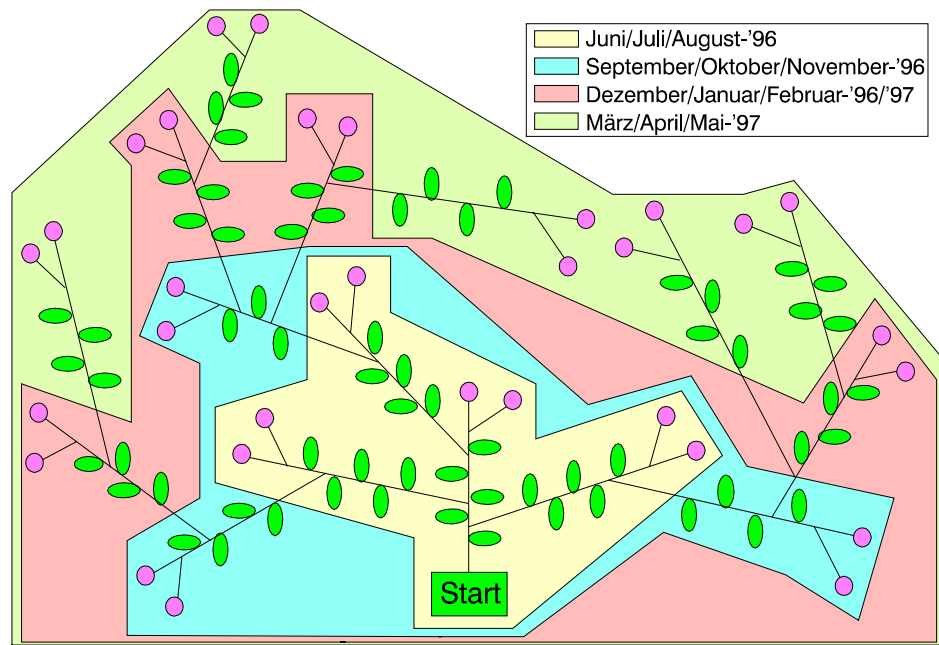


Abb. 17: Schematische Darstellung des sympodialen Wachstums einer Gerberapflanze und Seitentriebbildung unter Berücksichtigung des Beobachtungszeitraumes. Die grünen Ellipsen stellen Blätter, die rosa Kreise Blumen dar.

Die verschiedenen Farbbereiche in Abb. 17 weisen auf den Zuwachs in Dreimonatsabschnitten hin (Juni bis August, September bis November, Dezember bis Februar, März bis Mai). Zusätzlich zu Häufigkeitsverteilungen der Blätter und Blumen pro Triebsegment konnten Mittelwerte für die gebildeten Blätter und Blumen pro Triebsegment in Abhängigkeit des Zeitraumes für die Sorte 'Moana' bestimmt werden (Abb. 18).

Dabei war die Tendenz erkennbar, dass die Anzahl der bis zur Blumenentwicklung ausgebildeten Blätter mit zunehmendem Alter der Pflanze abnahm, wobei der Zeitraum, der durch unterschiedliche Einstrahlungssummen charakterisiert wurde, ebenfalls Einfluss darauf hatte. Geringere Einstrahlungssummen in den Monaten Dezember bis Mai bedingten entgegen dem Trend einen Anstieg der Anzahl an Blättern, die sich je Triebsegment bis zur Blumenentwicklung bildeten. Dagegen konnte für die Anzahl der pro Triebsegment gezählten Blumen keine Abhängigkeit von der Jahreszeit oder dem Pflanzenalter beobachtet werden. Bei einer Schwankungsbreite von eins bis vier Blumen pro Triebsegment lag der Mittelwert während des ersten Kulturjahres bei zwei Blumen pro Triebsegment. Diese Ergebnisse wurden durch Beobachtungen von LEFFRING (1981) gestützt.

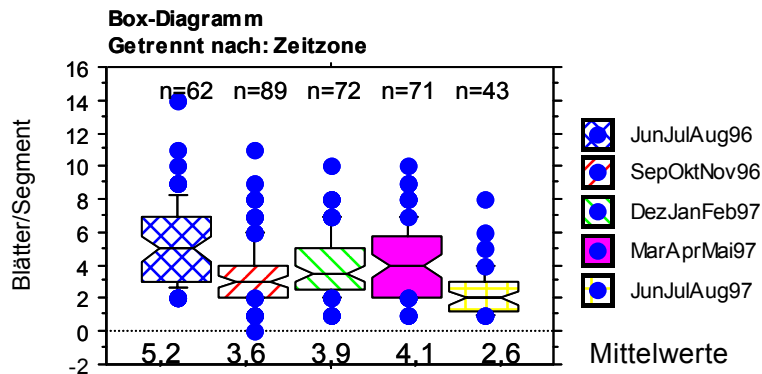


Abb. 18: Box-Diagramm für die Anzahl an Blättern je Triebsegment in Abhängigkeit vom Beobachtungszeitraum. Innerhalb des durch die Box markierten Wertebereichs liegen 50 Prozent der Werte. Der Mittelstrich entspricht dem Median, die außerhalb der Boxen liegenden Striche sind die 10 und 90 % Perzentilmarken, die Punkte stellen Ausreißer dar.

5.4 Entwicklungszeit der Blätter

Als Resultat der Wachstumsbeobachtungen an den Blättern ergab sich ein mathematisches Teilmodell für die Berechnung der Zeitdauer vom Erkennen des Blattes am Vegetationspunkt bis zur Vollentwicklung der Blattspreite.

Während des Beobachtungszeitraumes erfolgte täglich mit Hilfe des Klimaregelcomputers eine Aufzeichnung der mittleren Einstrahlung und Tagesdauer. Aus beiden Werten wurde die Tageslichtsumme im Zeitraum der Blattentwicklung der Blätter berechnet. Die Dauer der Blattentwicklung nahm mit zunehmenden mittleren Tageslichtsummen ab, was anhand eines Polynoms zweiten Grades dargestellt werden konnte, so dass die Dauer der Blattentwicklung bei geringerer Einstrahlung von zum Beispiel 1,0 MWs PAR m⁻² mit mittleren 50 Tagen 20 Tage länger dauerte als bei 3,0 MWs PAR m⁻² (Abb. 19).

Bei Anwendung der Regressionsgleichung innerhalb des Modells bestand die Möglichkeit, dass sich die Entwicklungszeit der Blätter bei Tageslichtsummen über 3,0 MWs PAR m⁻² gegen Null entwickelte und dabei die biologischen Grenzen unterschritten wurden. Damit dieses nicht geschah, wurde bei Tageslichtsummen über 3,0 MWs PAR m⁻² eine minimale Entwicklungszeit von 30 Tagen angenommen.

Die verschiedenen Bewässerungsstrategien beeinflussten die Beziehung zwischen Tageslichtsumme und Entwicklungsdauer nicht, so dass die Daten aller Varianten in die Berechnung von Gleichung (1) einfließen konnten.

$$A_{\max} = p_{A_{\max 1}} * \text{Tageslichtsumme}^2 + p_{A_{\max 2}} * \text{Tageslichtsumme} + p_{A_{\max 3}} \quad (1)$$

mit

$$\begin{aligned} p_{A_{\max 1}} &= -2,9914 \\ p_{A_{\max 2}} &= 2,1536 \\ p_{A_{\max 3}} &= 51,1122 \end{aligned}$$

wobei A_{\max} der prognostizierten Blattentwicklungsdauer in Tagen entsprach und $p_{A_{\max}1}$, $p_{A_{\max}2}$ sowie $p_{A_{\max}3}$ Regressionskoeffizienten waren. Die Tageslichtsumme wurde in MWs m^{-2} PAR ausgedrückt.

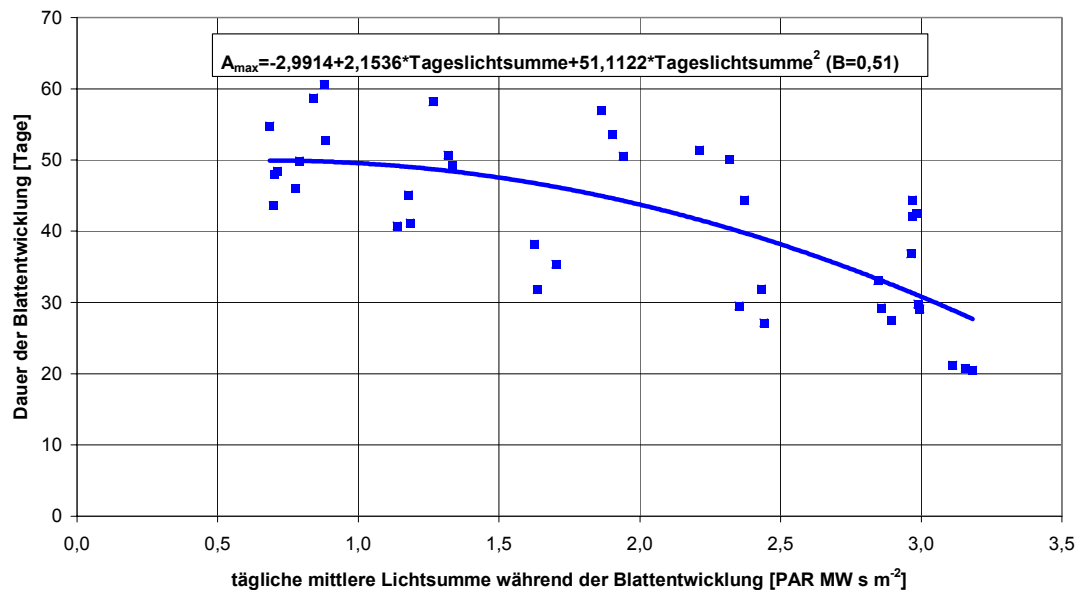


Abb. 19: Dauer der Blatentwicklung bis zum Erreichen der maximalen Blattfläche von *Gerbera jamesonii* 'Moana' in Abhängigkeit von der mittleren Tageslichtsumme während der Blatentwicklung (Anhang D, Tab. 9).

5.5 Transmissionrate

Aus den Einstrahlungsmesswerten oberhalb und unterhalb der Blattspreiten wurden durch Quotientenbildung die Anteile der transmittierten PAR-Einstrahlung berechnet. Die Transmissionsrate betrug im Mittel über die drei Prüfglieder des Prüffaktors 'Bewässerungsstrategie' 0,0313. Der Mittelwert für das erste Prüfglied unterschied sich von denen der anderen. Während Blätter des ersten Prüfgliedes im Mittel 2,6 % der Einstrahlung durchließen, waren es bei den Prüfgliedern 2 und 3 im Mittel 3,6 %. Das Ergebnis wies darauf hin, dass die geringere Wasserverfügbarkeit und die höheren Nährsalzkonzentrationen des ersten Prüfgliedes die Blattstruktur beeinflussten, wobei ein geringerer Transmissionskoeffizient ein höheres PAR-Absorptionsvermögen der Blätter belegte.

Ein höheres Absorptionsvermögen kann dabei auf eine höhere Lichtausnutzung durch die Blätter und damit eventuell auf eine erhöhte Photosyntheseeffizienz hinweisen. Jedoch konnte nicht überprüft werden, ob das absorbierte Licht in photochemische Energie umgesetzt oder in Form von Fluoreszenz oder Wärmedissipation ungenutzt wieder abgegeben wurde (MATSCHE und RICHTER, 1998). Beim Tensiomat gesteuerten Bewässerungsprüfglied lagen höhere Nährsalzkonzentrationen in der Mattenlösung vor (Abb. 4). Deren Einfluss auf die apparente Netto- CO_2 -Austauschrate wurde in Abschnitt 5.11.4 untersucht. Da ein direkter Zusammenhang zwischen PAR-Absorptionsvermögen und Netto- CO_2 -Austauschrate nicht nachgewiesen werden konnte, wurde im Modell die mittlere Transmissionsrate mit dem Wert 0,0313 verwendet.

5.6 Attenuationskoeffizient

In Pflanzenmodellen wurde die Berechnung der Lichtabschwächung durch die Blattschichten innerhalb eines Bestandes allgemein durch eine Funktion in Anlehnung an Lambert-Beer's Gesetz für die Lichtabschwächung in einem trüben Medium beschrieben:

$$I = I_0 \cdot \exp(-k_{\text{att}} \cdot \text{BFI}) \quad (2)$$

Dabei entsprachen I_0 und I [W m^{-2}] den Einstrahlungen oberhalb und innerhalb des Bestandes unter Berücksichtigung des kumulierten Blattflächenindex BFI [m^2 Blattfläche m^{-2} Boden], wobei k_{att} als Lichtabschwächungs- oder Attenuationskoeffizient bezeichnet wurde.

An die Beziehung zwischen der vom Bestand absorbierten Einstrahlungsmenge und dem Blattflächenindex konnte eine exponentielle Funktion angepasst werden, die auf dem rechten Teil von Gleichung (2) beruhte, der dem Anteil der unterhalb des Bestandes ankommenden Einstrahlung entsprach. Bei allen Modellberechnungen der Einstrahlungsattenuation im Bestand wurde der errechnete Koeffizient $k_{\text{att}}=0,77$ verwendet (Abb. 20).

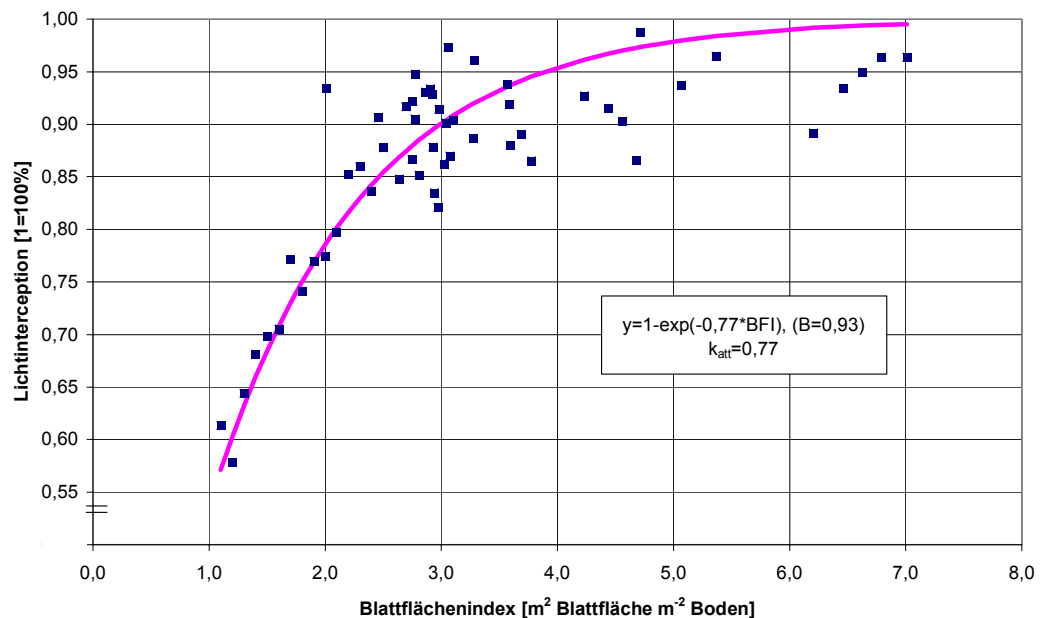


Abb. 20: Ermittlung des Attenuationskoeffizienten k_{att} mittels Anpassung einer Exponentialfunktion an die Lichtinterception des Bestandes in Abhängigkeit vom Blattflächenindex (Anhang D, Tab. 11).

5.7 Bildung neuer Blätter

Das Wachstum der Pflanzen war von der Bildung neuer Blätter abhängig, da Blätter nicht mehr weiterwuchsen und die Alterung begann, nachdem die maximale Blattfläche erreicht worden war. Anhand der Wachstumsbeobachtungen konnte eine Abhängigkeit der Bildungsrate neuer Blätter, $\gamma(t)$ [$\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$], von der Wochenlichtsumme und dem Blattflächenindex beobachtet werden. Die Dynamik folgte bis zu einem Blattflächenindex von $2,8 \text{ m}^2$ Blattfläche m^{-2} Boden einer linearen Funktion. Darüberhinaus wich die Bildungsrate neuer Blätter von dieser ab.

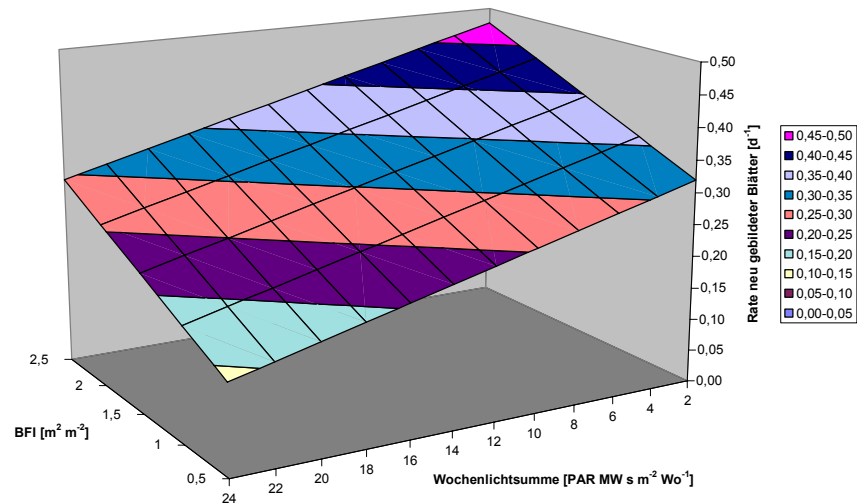


Abb. 21: Berechnung der Bildungsrate neuer Blätter bei einem Blattflächenindex kleiner als $2,8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ bei der Modellerstellung für *Gerbera jamesonii* 'Moana'.

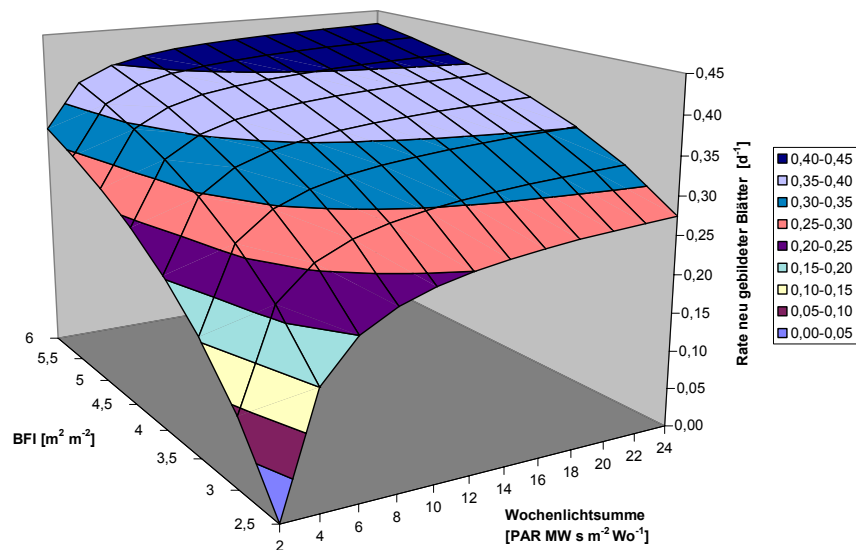


Abb. 22: Berechnung der Bildungsrate neuer Blätter bei einem Blattflächenindex und größer bzw. gleich $2,8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (b) bei der Modellerstellung für *Gerbera jamesonii* 'Moana'.

Das Erreichen des Blattflächenindex (BFI) von $2,8 \text{ m}^2 \text{ Blattfläche m}^{-2} \text{ Boden}$ fiel mit dem Zeitraum der niedrigsten Wochenlichtsummen zusammen, so dass das Wachstum durch ungünstige Außenbedingungen begrenzt wurde und die Neubildung von Blättern ein Minimum erreichte. Mit danach ansteigenden Lichtsummen stieg die Bildungsrate neuer Blätter in Abhängigkeit vom Blattflächenindex und der Wochenlichtsumme hyperbolisch an, wodurch ein Sättigungswert bei höheren Blattflächenindices impliziert, jedoch während des Beobachtungszeitraumes nicht erreicht wurde (Abb. 21 und 22).

Falls $\text{BFI} < 2,8 \text{ m}^2 \text{ Blattfläche m}^{-2} \text{ Boden}$, dann:

$$\gamma(t) = (p_{\gamma 1} + p_{\gamma 2} * \text{Wochenlichtsumme} + p_{\gamma 3} * \text{BFI}) * \text{Stw} \quad (3 \text{ a})$$

Falls $BFI \geq 2,8 \text{ m}^2 \text{ Blattfläche m}^{-2} \text{ Boden}$, dann:

$$\gamma(t) = \frac{p_{\gamma 4} + p_{\gamma 5} * (\text{Wochenlichtsumme} * BFI) + \text{Wochenlichtsumme} * BFI}{p_{\gamma 6} * \text{Wochenlichtsumme} * BFI} * Stw \quad (3 \text{ b})$$

mit den Koeffizienten für (3 a): $p_{\gamma 1}=0,297$, $p_{\gamma 2}=-8,210\text{E-}09$, $p_{\gamma 3}=0,078$ ($B=0,78$)
für (3 b): $p_{\gamma 4}=-2762547,52$, $p_{\gamma 5}=-1,115$, $p_{\gamma 6}=1,852$ ($B=0,85$)

und der Standweite des Bestandes $Stw = 6,7 \text{ Pflanzen m}^{-2}$,
wobei die Wochenlichtsumme mit der Einheit $Ws \text{ m}^{-2}$ einbezogen wurde.

Diese mathematische Beschreibung der Dynamik der Bildung neuer Blätter diene als Grundlage zur Modellierung des Pflanzenwachstums (Gleichungen 3a und 3b). Da die Wachstumsbeobachtungen nicht über mehrere Kulturperioden durchgeführt werden konnten und keine ausreichenden Informationen über die Wechselbeziehungen zwischen den entsprechenden Pflanzen- und Klimaparametern zur Verfügung standen, wurde im Modell diese zweigeteilte beschreibende Funktion verwendet.

5.8 Blattsterberate

Die Sterberate von Blättern je Tag und Pflanze erwies sich während der Wachstumsbeobachtungen als abhängig vom Blattflächenindex und der Wochenlichtsumme, wobei die Beziehung zwischen Sterberate und Blattflächenindex linear verlief und durch abnehmende Wochenlichtsummen in der lichtarmen Jahreszeit zusätzlich verstärkt wurde. (Abb. 23).

$$\text{Absterberate} = \left| p_{\text{tot}1} + p_{\text{tot}2} * BFI + \frac{p_{\text{tot}3}}{\text{Wochenlichtsumme}} \right| * Stw * BMw \quad (4)$$

mit den Koeffizienten $p_{\text{tot}1}=-0,299$, $p_{\text{tot}2}=0,127$, $p_{\text{tot}3}=0,614$ ($B=0,50$) und dem Mittelwert der Blattfläche vollentwickelter Blätter $BMw [\text{m}^2]$ (Abschnitt 5.13.3.4, Gleichung 54).

Ältere von jüngeren schattierte Blätter erhielten in der lichtarmen Jahreszeit zu wenig photosynthetisch aktive Strahlung zur Erhaltung der Blattmasse und starben zunehmend ab. Für die mathematische Beschreibung der Sterberate wurde eine lineare Funktion in Abhängigkeit vom Blattflächenindex mit einer von der Wochenlichtsumme abhängigen inversen hyperbolischen Funktion kombiniert und angepasst (Gleichung 4). Das Bestimmtheitsmaß war mit $B=0,50$ gering und deutete damit an, dass sich weitere Einflussgrößen außer dem Blattflächenindex und der Wochenlichtsumme auf die Blattsterberate auswirkten, hier aber nicht untersucht werden konnten. Dennoch wurde diese Funktion für eine rechnerische Bestimmung der Blattsterberate ab einem Blattflächenindex $> 2,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ in das Modell übernommen.

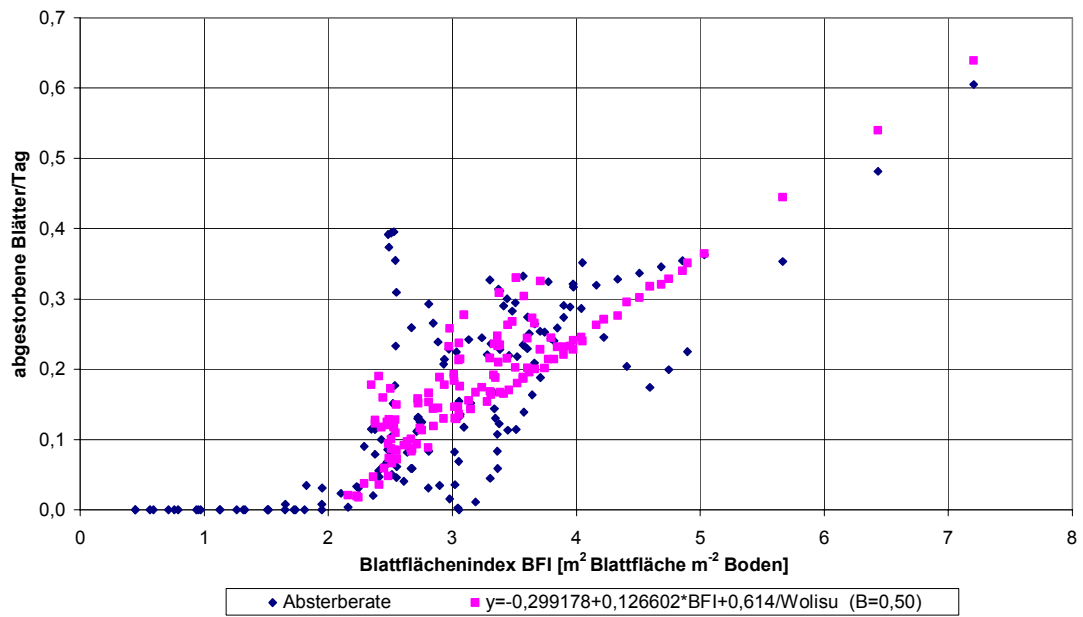


Abb. 23: Sterberate der Blätter von *Gerbera jamesonii* 'Moana' in Abhängigkeit vom Blattflächenindex. Die Regressionsgleichung schließt neben dem Blattflächenindex die Abhängigkeit von der Wochenlichtsumme mit ein.

5.9 Blumenwachstum

Während der Wachstumsbeobachtungen wurden an sich entwickelnden Blumen die Blumenstiellängen gemessen. Von Beginn der Messungen bis zur letzten konnte tendenziell in allen drei Bewässerungsprüfgliedern eine Zunahme der Blumenstiellängen beobachtet werden (Abb. 24).

Der Blumenstielzuwachs einer Blume wies ein sigmoidales Wachstumsverhalten auf, wobei die obere Krümmung der Kurve aufgrund des Erntetermines bei beginnender Ausreifung des Blütenstandes früh abgeschnitten wurde. Dagegen deutete die Steigung zu Beginn des Wachstums auf eine starke Abhängigkeit von der Einstrahlung hin, da im Zeitraum von Ende September bis Ende März der anfängliche Zuwachs der Blumenstiellänge stark verlangsamt war, was auf die geringeren Lichtintegrale während der Herbst- und Wintermonate zurückgeführt werden konnte.

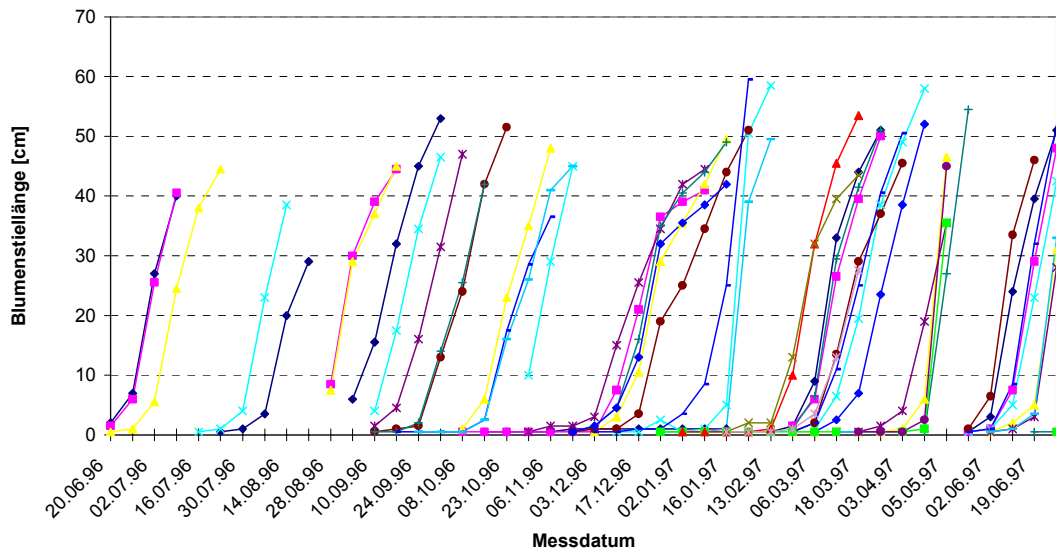


Abb. 24: Beispiel des Blumenstielzuwachses aller während des Zeitraums der Wachstumsbeobachtungen gebildeten Blumen einer *Gerbera jamesonii* 'Moana' des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung. Die einzelnen Blumen unterscheiden sich durch die Farbgebung.

5.10 Blumenparameter

An den während der Wachstumsbeobachtungen geernteten Blumen der Gerbera wurden die Stiel- und Blumendurchmesser sowie Stiellängen gemessen. Anschließend erfolgte eine Trocknung in einem Trockenschrank bei 105 °C auf Gewichtskonstanz. Bei einer Gegenüberstellung dieser Prüfmerkmale mit den mittleren Wochenlichtsummen während der Blumenentwicklung waren zunehmende Werte bei steigenden Wochenlichtsummen erkennbar (Abb. 25). Da sich zwischen den Prüfgliedern des Prüffaktors 'Bewässerungsstrategie' hinsichtlich der Messwerte aufgrund einer hohen Streuung keine signifikanten Unterschiede nachweisen ließen, gingen alle Daten ohne Berücksichtigung der Bewässerungsstrategie in die Regressionsanalysen mit ein.

War der Zusammenhang zwischen Blumendurchmesser und Wochenlichtsumme nur gering ($B=0,31$), ergab sich hinsichtlich des Blumentrockengewichtes ein wesentlich stärkerer Zusammenhang ($B=0,65$). Anhand des Blumenstiieldurchmessers war

ein schwach positiver linearer Trend mit Zunahme der Wochenlichtsumme erkennbar, der durch ein Bestimmtheitsmaß von $B=0,46$ angedeutet wurde.

Analog zur Zunahme des Trockengewichtes nahm dessen Anteil am Frischgewicht bei höheren Wocheneinstrahlungssummen zu (Abb. 26). Ein Einfluss auf die Stiellänge bestand nicht.

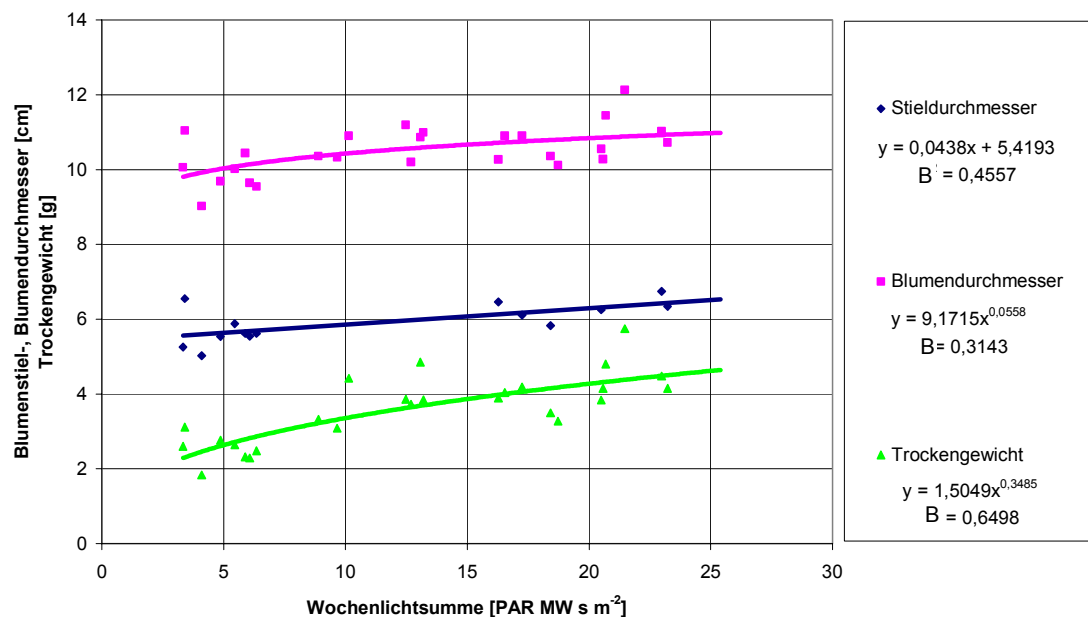


Abb. 25: Trockengewicht, Blumen- und Stieldurchmesser der Blumen von *Gerbera jamesonii* 'Moana' in Abhängigkeit von der Wochenlichtsumme (Anhang D, Tab. 10).

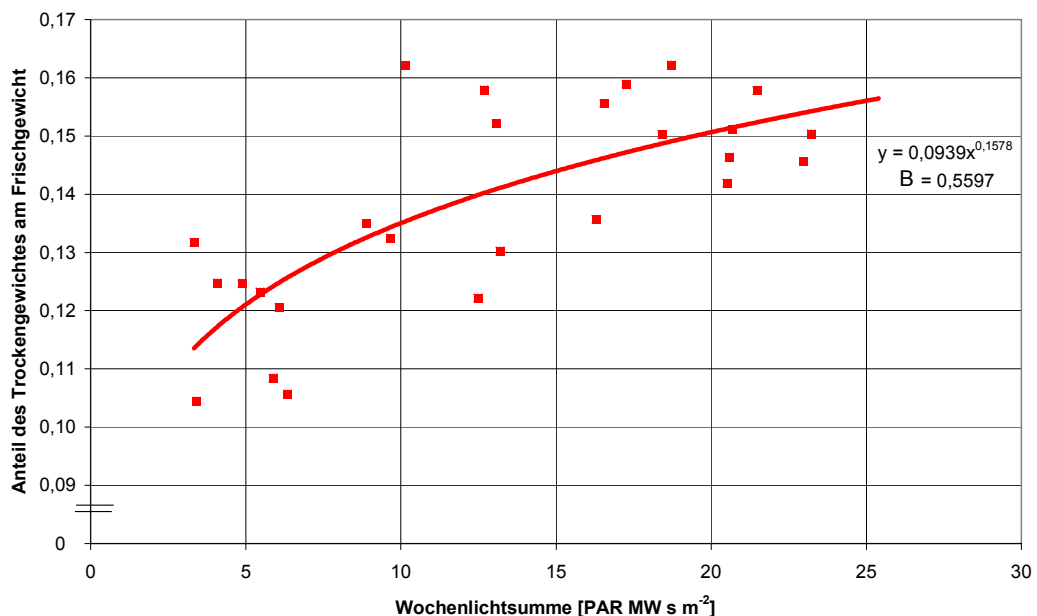


Abb. 26: Anteil des Trockengewichtes am Frischgewicht der Blumen von *Gerbera jamesonii* 'Moana' in Abhängigkeit von der Wochenlichtsumme (Anhang D, Tab. 10).

5.11 Parameter der Photosynthese

Bei den Gaswechselfmessungen wurde die apparente Netto-CO₂-Austauschrate ermittelt, welche als indirektes Maß für die Photosyntheseleistung der Pflanzen diente. Zur mathematischen Darstellung der apparenten Netto-CO₂-Austauschrate fand in den Modellberechnungen eine hyperbolische Funktion Verwendung wie sie MARSHALL und BISCOE (1980 a) für C₃-Pflanzen herleiteten. Auf der Annahme basierend, dass die Brutto-CO₂-Austauschrate P_g gleich der Summe aus Netto-CO₂-Austauschrate P_n und Dunkelatmung R_d ist, ergab sich:

$$P_g = P_n + R_d = \frac{\alpha * I * (P_{\max} - \theta * P_n)}{(1 - \theta) * \alpha * I + (P_{\max} - \theta * P_n)} \quad (5)$$

Dabei besaßen die Parameter der Funktion eine Bedeutung im physiologischen Sinn:

- α war die photochemische Effizienz und entsprach der Steigung der apparenten Netto-CO₂-Austauschrate bei einer Einstrahlung gegen Null
- P_{\max} war die maximale Rate der Photosynthese und war von der CO₂-Konzentration der Umgebungsluft C_a und dem Diffusionswiderstand für CO₂ zwischen Atmosphäre und dem Ort der CO₂-Fixierung abhängig

$$P_{\max} = \frac{C_a}{r_d + r_x} \quad (6),$$

wobei r_d den Diffusionswiderstand der Grenzschicht, der Stomata und des Mesophylls enthielt und r_x den Carboxylierungswiderstand der biochemischen Reaktion darstellte

- θ spiegelte das Verhältnis des physikalischen zum Gesamtwiderstand der Diffusion von CO₂ zwischen Atmosphäre und Ort der CO₂-Fixierung wider

$$\theta = \frac{r_d}{r_d + r_x} \quad (7)$$

- R_d bezeichnete die Dunkelatmungsrate

Für die Modellberechnungen wurde Gleichung (5) nach P_n aufgelöst und in eine quadratische Gleichung umgewandelt, was nach MARSHALL und BISCOE (1980 a) folgendes ergab:

$$0 = a * P_n^2 + b * P_n + c \quad (8)$$

wobei

$$a = \theta$$

$$b = -(P_{\max} + \alpha * I - \theta * R_d)$$

$$c = \alpha * I * (P_{\max} - (1 - \theta) * R_d) - R_d * P_{\max}$$

und schließlich für P_n aufgelöst:

$$P_n = \frac{(P_{\max} + \alpha * I - \theta * R_d) - \sqrt{(P_{\max} + \alpha * I - \theta * R_d)^2 - 4 * \theta * (\alpha * I * (P_{\max} - (1 - \theta) * R_d) - R_d * P_{\max})}}{2 * \theta} \quad (9)$$

Die Messergebnisse der Gaswechsellmessungen zu den Einflussgrößen Temperatur, CO₂-Konzentration und Blattalter der Umgebungsluft wurden in Abhängigkeit von der Einstrahlungsstärke mittels der SPSS-Regressionsprozedur für nicht-lineare frei definierte Funktionen an Gleichung (9) angepasst, um die Photosyntheseparameter α , P_{\max} , θ und R_d zu ermitteln.

5.11.1 Temperatur

Die apparente Netto-CO₂-Austauschrate erwies sich bei einer der Umgebungsluft folgenden mittleren CO₂-Konzentration von 7,59E-04 kg CO₂ m⁻³ (412 ppm) und zunehmenden Einstrahlungsintensitäten von 2 bis 339 W m⁻² PAR als abhängig von der Lufttemperatur innerhalb der Messküvette. Bei Einstrahlungen zwischen 150 und 200 W m⁻² erreichte die Austauschrate ein temperaturspezifisches Sättigungsniveau, wonach jede weitere Erhöhung der Einstrahlungsintensität keine oder nur noch geringe Steigerungen erbrachte (Abb. 27).

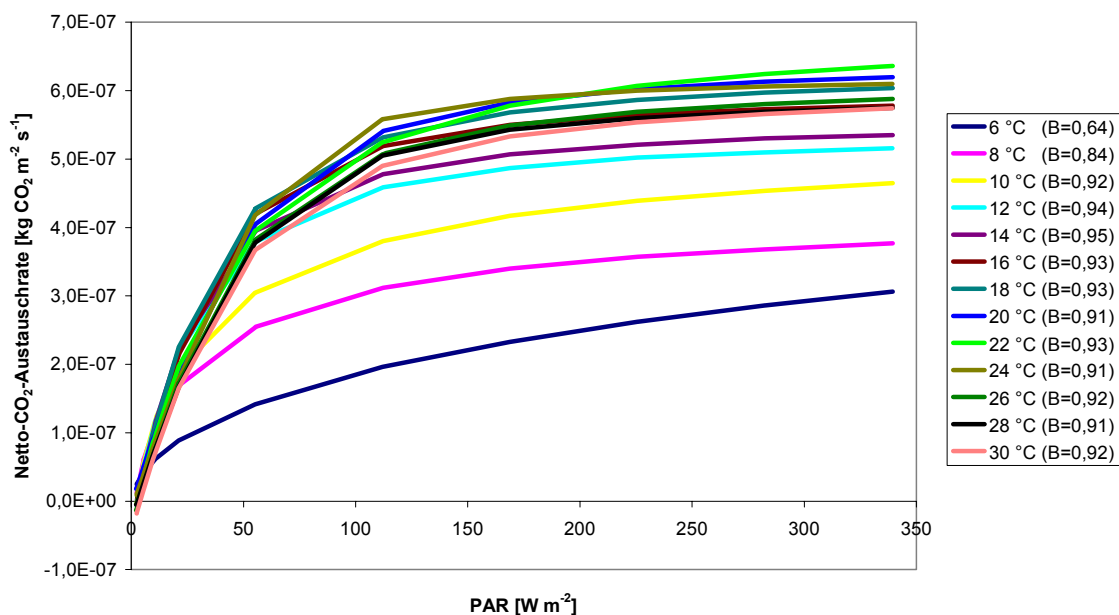


Abb. 27: Abhängigkeit der apparenten Netto-CO₂-Austauschrate von *Gerbera jamesonii* 'Moana' von der Lufttemperatur bei einer mittleren CO₂-Konzentration der Luft von 7,59E-04 kg CO₂ m⁻³ (412 ppm) und gesteigerten Einstrahlungsintensitäten (Anhang D, Tab 12).

Ausgehend von einer Temperatur von 6 °C war eine Erhöhung des Sättigungsniveaus bis zu einer Temperatur von 22 °C zu erkennen. Danach führte jede weitere Temperatursteigerung bis 30 °C zu geringeren maximalen apparenten Netto-CO₂-Austauschraten.

Der berechnete Photosyntheseparameter α war nur gering abhängig von der Lufttemperatur und zeigte mit zunehmender Temperatur bis zu 12 °C eine zunehmende und darüber hinaus eine abnehmende Tendenz, die sich mit einem Polynom zweiten Grades in Abhängigkeit der Temperatur darstellen ließ, wobei das Bestimmtheitsmaß bedingt durch die Variabilität der Daten niedrig ausfiel (Abb. 28). Eine abnehmende Tendenz von α in Verbindung mit steigenden Temperaturen im Bereich von 15 bis 25 °C wurde ebenfalls von KU und EDWARDS (1978) für Weizen und von EHLERINGER und BJÖRKMAN (1977) für andere C₃-Pflanzen beobachtet.

Eine starke Abhängigkeit zeigte der Parameter P_{\max} . Dieser stieg bis 22 °C kontinuierlich an, um dann bei höheren Temperaturen wieder abzusinken (Abb. 29). Der

Anstieg von P_{\max} in Abhängigkeit von der Temperatur wurde auch von WOLEDGE und DENNIS (1982) für Weißklee belegt. Die Autoren beobachteten eine stete Steigerung von P_{\max} bei Temperaturen von 5 bis 25 °C und schlugen daher eine lineare Beziehung zwischen P_{\max} und der Temperatur vor. Das Ergebnis für die Gerberakultur basiert auf einer Temperatursteigerung bis 30 °C, so dass der Abfall von P_{\max} über 22 °C hinaus den Beobachtungen von WOLEDGE und DENNIS (1982) mit Ausnahme des Maximums bei 22 °C nicht unbedingt widerspricht und der Zusammenhang zwischen P_{\max} und der Temperatur besser mit einem Polynom zweiten Grades beschrieben werden konnte.

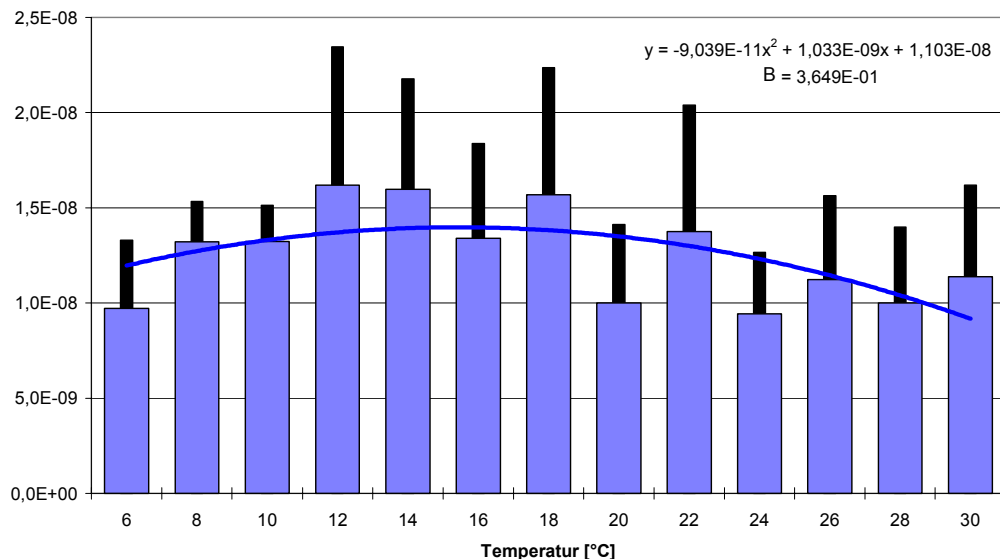


Abb. 28: Photosyntheseparameter α nach Anpassung der apparenten Netto- CO_2 -Austauschraten an Gleichung (9) in Abhängigkeit von der Temperatur. Die schwarzen Balken geben den Standardfehler an.

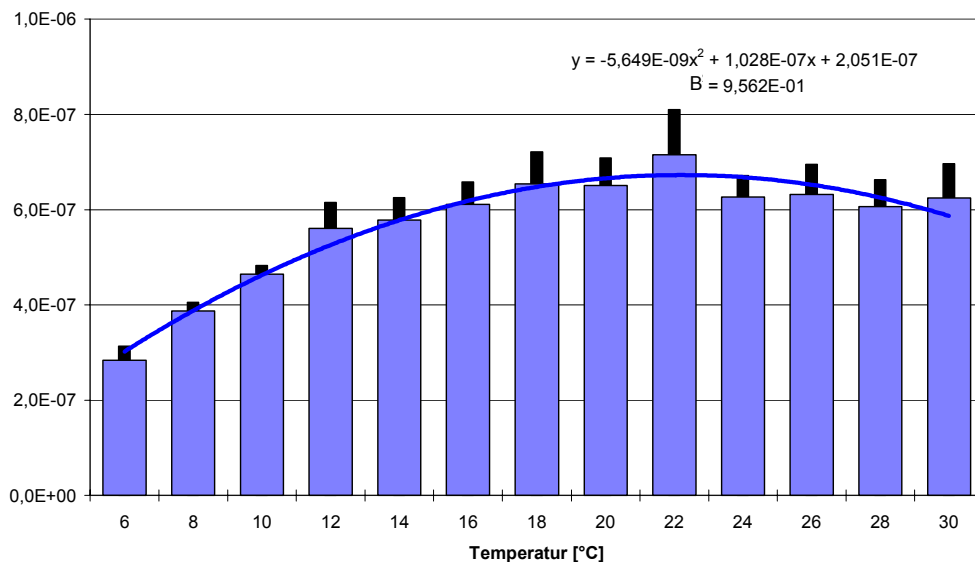


Abb. 29: Photosyntheseparameter P_{\max} nach Anpassung der apparenten Netto- CO_2 -Austauschraten an Gleichung (9) in Abhängigkeit von der Temperatur. Die schwarzen Balken geben den Standardfehler an.

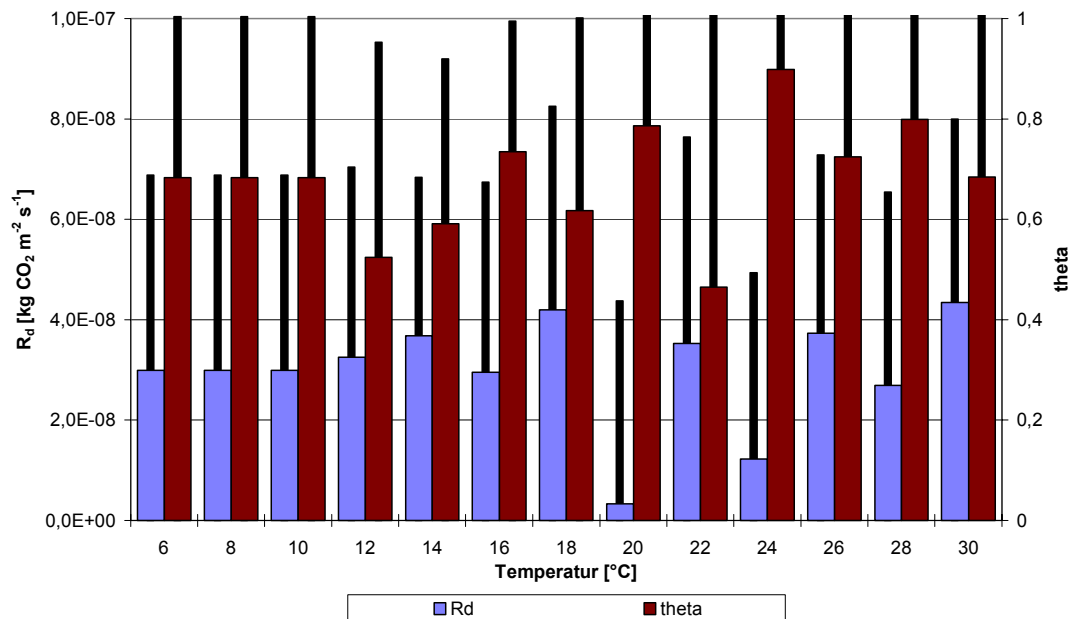


Abb. 30: Photosyntheseparameter R_d und θ nach Anpassung der apparenten Netto- CO_2 -Austauschraten an Gleichung (9) in Abhängigkeit von der Temperatur. Die schwarzen Balken geben den Standardfehler an.

Der Parameter R_d als Indikator für den Anteil der Dunkelatmung zeigte keine eindeutige Abhängigkeit von der Temperatur und wurde daher mit seinem Mittelwert von $R_d = 2,992\text{E-}08 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ als konstant angenommen (Abb. 30).

Das Verhältnis des physikalischen Widerstandes der CO_2 -Diffusion zum Gesamtdiffusionswiderstand θ wies mit einem Mittelwert von 0,683 ebenfalls keine einheitliche Tendenz in Beziehung zur Steigerung der Temperatur auf (Abb. 30). Eine erhebliche Veränderung der physikalischen und biochemischen Widerstände in Abhängigkeit des relativ engen Temperaturbereichs für die Gerberakultur ist unwahrscheinlich, so dass sich, wie auch von JOHNSON und THORNLEY (1984) beschrieben, der Einfluss der Temperatur hauptsächlich auf den Parameter P_{\max} und nur geringfügig auf α beschränkte.

5.11.2 CO_2 -Konzentration der Luft

Die apparente Netto- CO_2 -Austauschrate der Gerbera wies eine hohe Abhängigkeit von der CO_2 -Konzentration der Umgebungsluft auf. Bei gleichbleibender Temperatur von 20 °C und drei verschiedenen Einstrahlungsintensitäten von 20, 180 und 340 W m^{-2} PAR wurde das höchste Netto- CO_2 -Austauschrateniveau bei CO_2 -Konzentrationen zwischen $2,31\text{E-}03$ und $3,05\text{E-}03 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3}$ (1260 bzw. 1660 ppm) erreicht. Eine Erhöhung auf $3,73\text{E-}03 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3}$ (2050 ppm) erbrachte keine weitere signifikante Steigerung des Sättigungsniveaus der apparenten Netto- CO_2 -Austauschrate (Abb. 31).

Bei der Anpassung der Messergebnisse an Gleichung (9) wurden die Parameter θ und R_d in Abhängigkeit vom Resultat der Temperaturmessreihen als konstant bei $\theta = 0,683$ und $R_d = 2,992\text{E-}08 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ festgesetzt. Auf dieser Basis konnten die Parameter α und P_{\max} für die unterschiedlichen CO_2 -Konzentrationsstufen berechnet werden. Für beide Parameter wurden Abhängigkeiten von der CO_2 -Konzentration ermittelt, die mit Polynomen zweiten Grades dargestellt werden konnten. Der Para-

meter α wies bei einer CO_2 -Konzentration von $2,31 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3}$ (1260 ppm) ein Maximum auf, P_{\max} zeigte ein solches erst bei $3,05 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3}$ (1660 ppm) (Abb. 32).

Die untersuchten Blätter waren den höheren CO_2 -Konzentrationen nur wenige Stunden ausgesetzt. Bei Konzentrationen von über 1000 ppm CO_2 sind in Versuchen mit anderen Sorten bereits Blattschäden aufgetreten (ESCHER et al., 1996), so dass hier auf die sortenabhängige Gültigkeit der Messergebnisse hingewiesen werden muss.

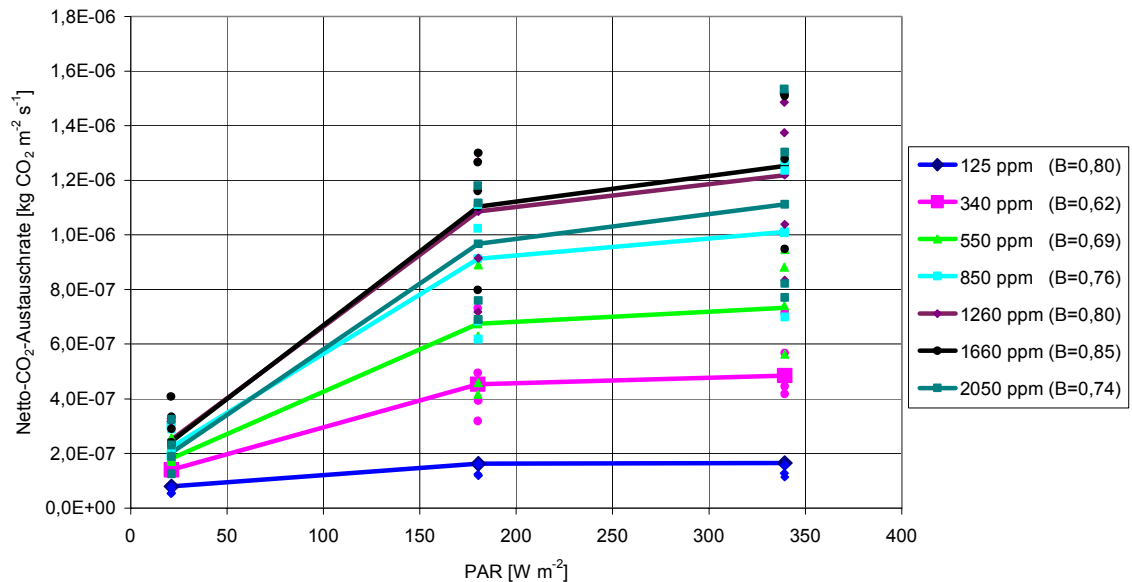


Abb. 31: Abhängigkeit der apparenten Netto- CO_2 -Austauschrate von *Gerbera jamesonii* 'Moana' von der CO_2 -Konzentration der Luft bei einer mittleren Lufttemperatur von 20°C und gesteigerten Einstrahlungsintensitäten (Anhang D, Tab. 13).

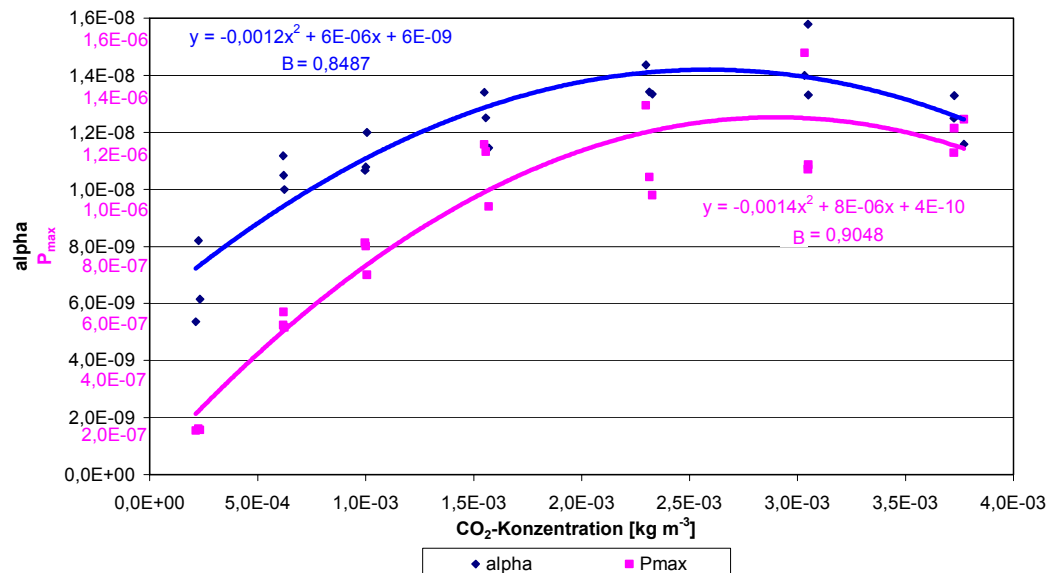


Abb. 32: Photosyntheseparameter α und P_{\max} nach Anpassung der apparenten Netto- CO_2 -Austauschraten an Gleichung (9) in Abhängigkeit von der CO_2 -Konzentration der Luft.

5.11.3 Alter der Blätter

Das Alter der einzelnen Blätter spielte eine wichtige Rolle bei der Ermittlung der Netto-CO₂-Austauschrate des Bestandes. Sich entwickelnde Blätter wiesen andere Photosyntheseleistungen auf als vollentwickelte oder alternde Blätter (GLOVER, 1974; MARSHALL und BISCOE, 1980 b). Dieses wurde in einer Messreihe mit 32 Blättern im Alter zwischen 20 und 282 Tagen bei drei Temperaturen (10, 20 und 30 °C) sowie drei Einstrahlungsstärken (3, 21 und 226 W m⁻² PAR) untersucht. Die Messungen fanden bei einer mittleren CO₂-Konzentration von 7,13E-04 kg CO₂ m⁻³ (390 ppm) statt. Eine Anpassung der ermittelten Netto-CO₂-Austauschraten an Gleichung (9) fand für jedes einzelne Blatt statt, um die Parameter α , P_{\max} und R_d zu berechnen, θ wurde in den Regressionsanalysen mit 0,683 als konstant angenommen.

Parameter α zeigte einen exponentiellen Abfall mit Zunahme des Blattalters. Zudem war α bei 10 °C außer bei den jüngsten Blättern stets niedriger als bei 20 und 30 °C. Zwischen den hohen Temperaturstufen konnte kein Unterschied beobachtet werden (Abb. 33).

Dieses Ergebnis schien im Gegensatz zu den Regressionsergebnissen in Abhängigkeit von der Temperatur zu stehen, da mit zunehmenden Umgebungslufttemperaturen abnehmende Werte für α berechnet wurden (Abb. 28). Die Messungen zum Einfluss der Temperatur fanden an jungen aber bereits vollentwickelten Blättern im mittleren Alter von 50 Tagen statt. Für dieses Alter lag die berechnete Exponentialfunktion für 10 °C unterhalb der für 20 und 30 °C. Bei jungen Blättern im Alter um 30 Tagen wies die Regressionlinie für 10 °C ein höheres α auf. Die Genauigkeit der Regressionslinien war aufgrund der enormen Variationsbreite für α bei jüngeren Blättern jedoch nicht befriedigend, so dass eine Fehleinschätzung des Parameters in Abhängigkeit von der Temperatur möglich war. Dagegen wurde das Ergebnis, dass α für die Temperaturen 20 und 30 °C keinen Unterschied anzeigte, durch das Sättigungsverhalten der Photosynthese bei Temperaturen über 22 °C belegt (Abb. 28).

Die Regressionsanalyse für den Parameter P_{\max} führte zur Anpassung einer Potenzfunktion an die in Abhängigkeit vom Blattalter ermittelten P_{\max} -Werte (Abb. 34). Hierbei zeigte sich, dass P_{\max} bei 10 °C stets niedriger war als bei 20 und 30 °C, wobei sich die Werte bei den höheren Temperaturen wie bei α nicht voneinander unterschieden. Ein Vergleich mit den Parameterwerten der Temperatur-Messreihe bestätigte dieses Verhalten von P_{\max} (Abb. 29).

Die Dynamik des Dunkelatmungsparameters R_d war, wie schon zuvor in der Temperaturmessreihe beobachtet, unabhängig von der Temperatur (Abb. 35). Die in Abhängigkeit vom Blattalter ermittelten R_d -Werte wiesen für die drei Temperaturstufen einen beinahe deckungsgleichen exponentiellen Abfall mit zunehmenden Blattalter auf.

Junge Blätter bedurften eines hohen Anteils an Dunkelatmung, dennoch waren aufgrund hoher α - und P_{\max} -Werte hohe Netto-CO₂-Austauschraten anzunehmen. Mit zunehmenden Alter nahmen die Dunkelatmungsrate wie auch die Parameter α und P_{\max} ab, wodurch die Netto-CO₂-Austauschrate geringer ausfiel. Der Verlauf der Netto-CO₂-Austauschrate konnte mit Hilfe der rechnerisch ermittelten Photosyntheseparameter für verschiedene Blattaltersstufen grafisch dargestellt werden und wies mit zunehmenden Blattalter eine abnehmende Netto-CO₂-Austauschrate auf (Abb. 36). Die maximalen Netto-CO₂-Austauschraten wurden bei Einstrahlungsintensitäten ab 150 bis 200 W m⁻² PAR erzielt, wodurch das Ergebnis der Temperaturmessreihe bestätigt wurde (Abb. 27).

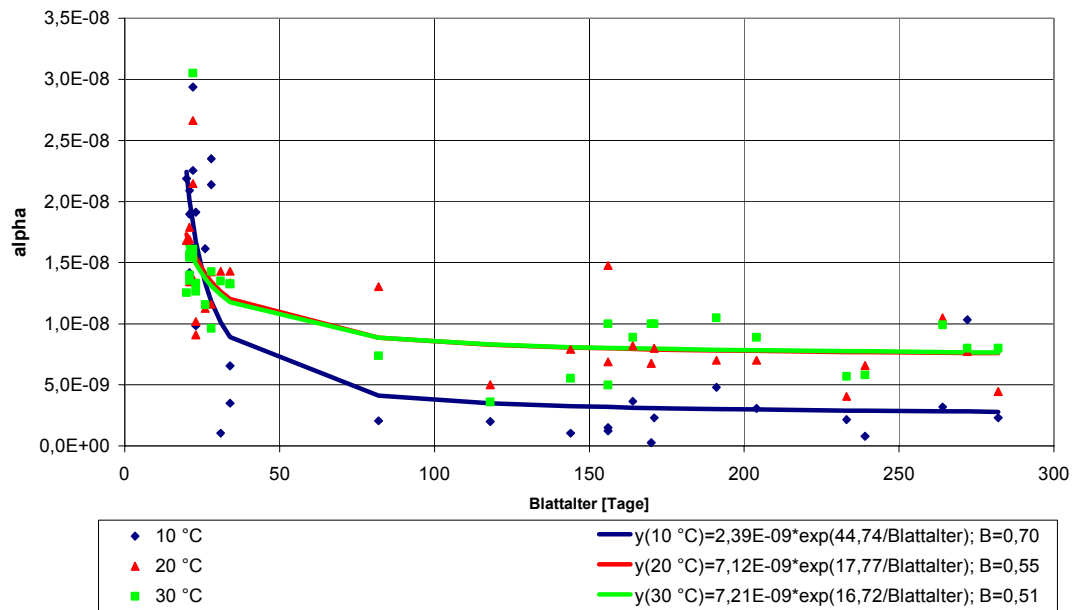


Abb. 33: Photosyntheseparameter α nach Anpassung der ermittelten Netto- CO_2 -Austauschraten an Gleichung (9) in Abhängigkeit vom Blattalter und der Lufttemperatur bei einer mittleren CO_2 -Konzentration der Luft von $7,13E-04 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3}$ (390 ppm).

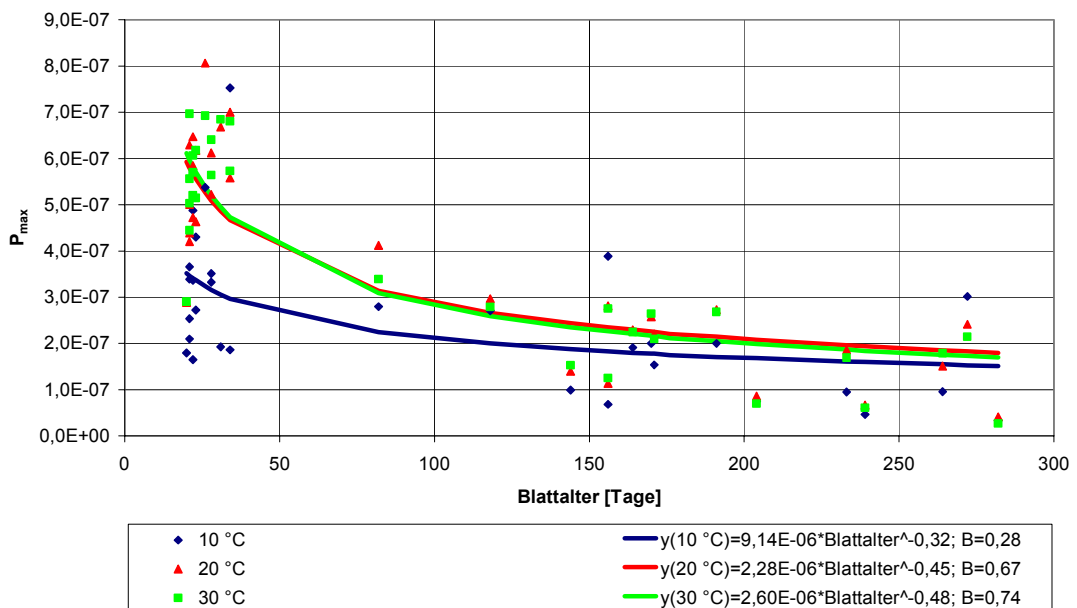


Abb. 34: Photosyntheseparameter P_{\max} nach Anpassung der apparenten Netto- CO_2 -Austauschraten an Gleichung (9) in Abhängigkeit vom Blattalter und der Lufttemperatur bei einer mittleren CO_2 -Konzentration der Luft von $7,13E-04 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3}$ (390 ppm).

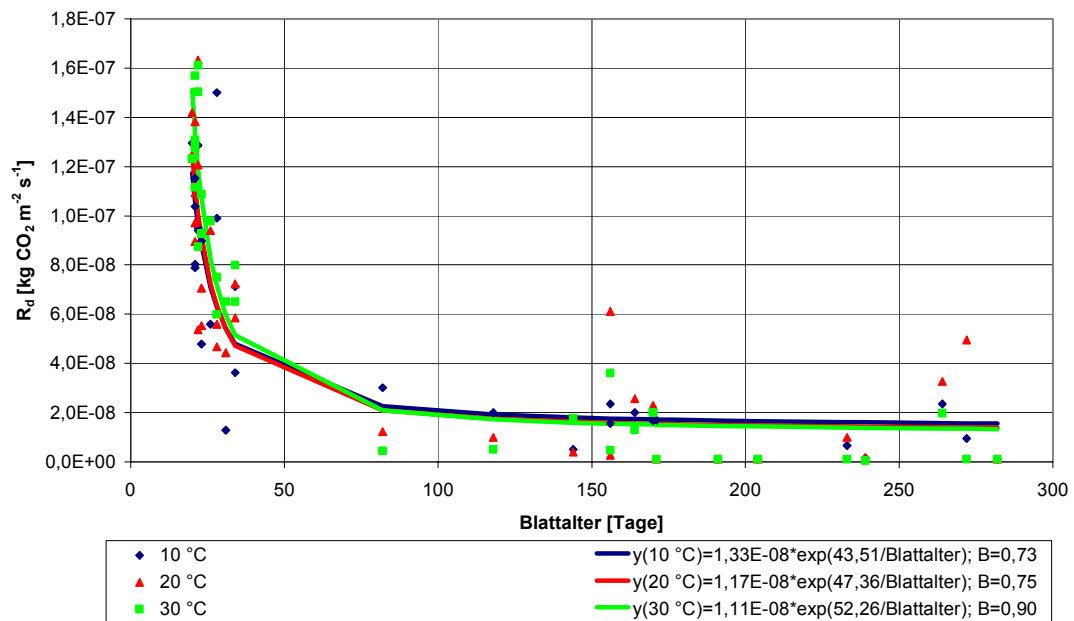


Abb. 35: Photosyntheseparameter R_d nach Anpassung der apparenten Netto- CO_2 -Austauschraten an Gleichung (9) in Abhängigkeit vom Blattalter und der Lufttemperatur bei einer mittleren CO_2 -Konzentration der Luft von $7,13\text{E-}04\text{ kg CO}_2\text{ m}^{-3}$ (390 ppm).

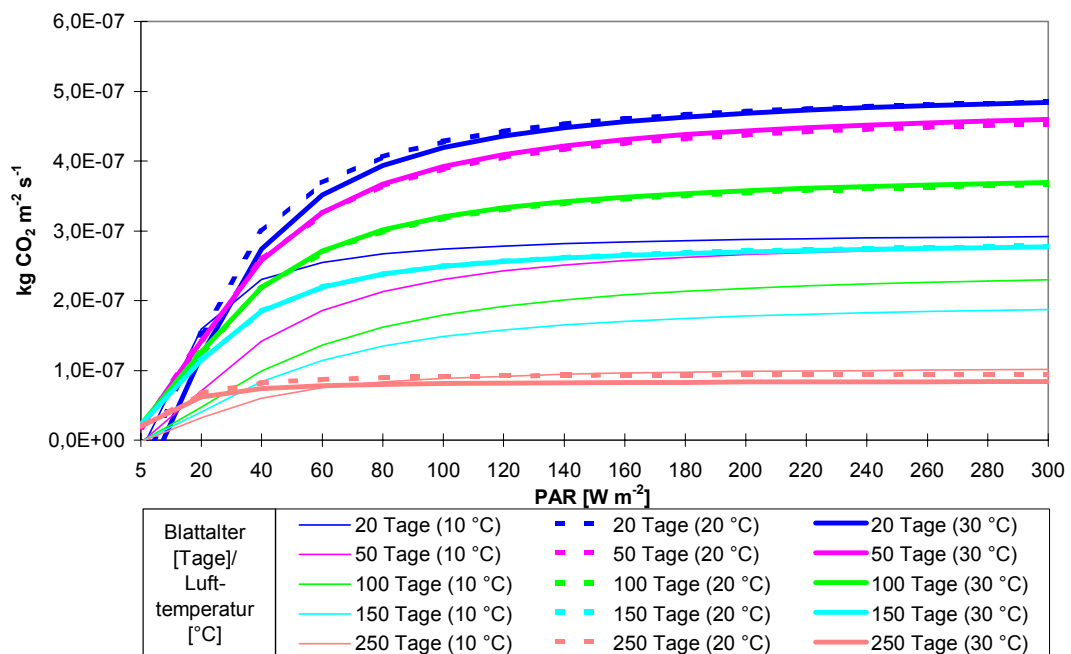


Abb. 36: Abhängigkeit der mit Hilfe von Gleichung (9) berechneten Netto- CO_2 -Austauschrates von *Gerbera jamesonii* 'Moana' vom Blattalter und von der Lufttemperatur bei einer CO_2 -Konzentration der Luft von $7,13\text{E-}04\text{ kg CO}_2\text{ m}^{-3}$ (390 ppm) und gesteigerten Einstrahlungsintensitäten (Anhang D, Tab. 14).

5.11.4 Stickstoffgehalt der Mattennährlösung

Der für die Pflanzen verfügbare Stickstoff in der Nährlösung im Wurzelraum ist für die Synthese organischer Verbindungen, die für den Gesamtstoffwechsel und die Photosynthese erforderlich sind, von Bedeutung (LARCHER, 1994). Ein Effekt der Düngungsintensität auf die apparente Netto-CO₂-Austauschrate war nicht auszuschließen und wurde daher überprüft. Die Steigerung des Stickstoffgehaltes in der Mattennährlösung erfolgte gleichzeitig mit allen anderen Nährstoffen im gleichen Verhältnis über eine Erhöhung der Leitfähigkeit in der Tropfnährlösung.

Die Messungen der apparenten Netto-CO₂-Austauschrate bei Einstrahlungsintensitäten von 10 bis 340 W m⁻² PAR in sechs Schritten gesteigert und CO₂-Konzentrationen von 6,36E-04, 1,57E-03 und 2,82E-03 kg CO₂ m⁻³ (350, 860 und 1530 ppm) ergaben für die geringste Konzentration keine Auswirkungen der Stickstoffgehalte auf die apparente Netto-CO₂-Austauschrate. Erst bei 1,57E-03 kg CO₂ m⁻³ zeigte sich, dass bei Stickstoffgehalten von 4,06E-05 bis 1,84E-04 kg N l⁻¹ (41 mg bis 184 mg N l⁻¹) die höchste Netto-CO₂-Austauschrate erzielt werden konnte und diese bei höheren Konzentrationen deutlich gehemmt wurde (Abb. 37). Bei einer CO₂-Konzentration von 2,82E-03 kg CO₂ m⁻³ (1530 ppm) waren die gemessenen Netto-CO₂-Austauschraten geringfügig höher, wiesen allerdings den gleichen Abfall bei Stickstoffgehalten ab 1,84E-04 kg N l⁻¹ (184 mg N l⁻¹) auf.

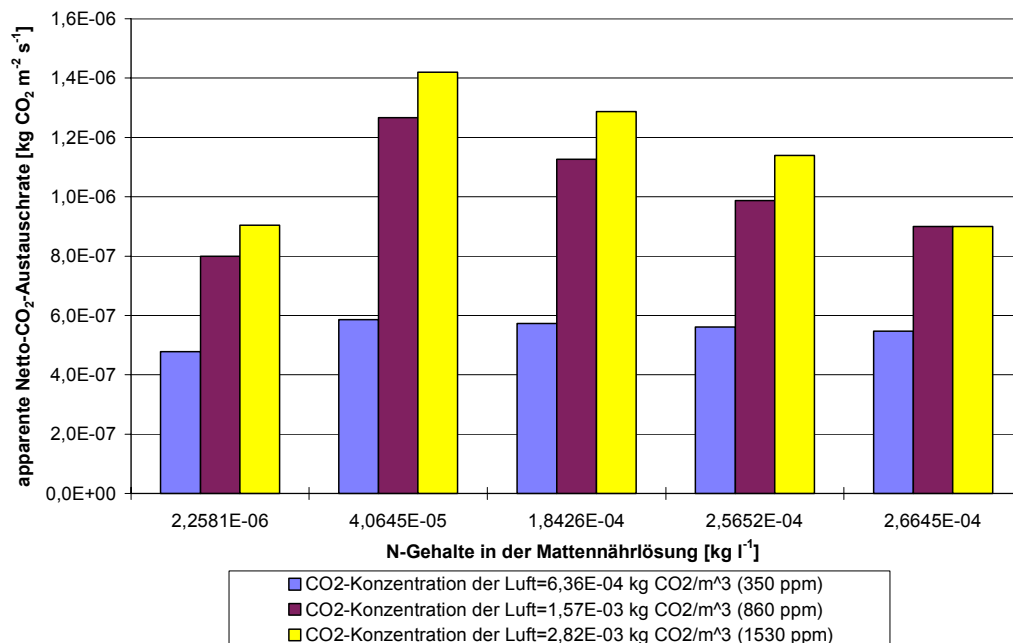


Abb. 37: Apparente Netto-CO₂-Austauschrate von *Gerbera jamesonii* 'Moana' bei 300 W m⁻² PAR Einstrahlungsintensität in Abhängigkeit von den N-Gehalten in der Mattennährlösung und der mittleren CO₂-Konzentration der Luft bei einer Lufttemperatur von 20 °C.

Die Analyse der Photosyntheseparameter α und P_{\max} bei konstanten $\theta=0,683$ und $R_d=2,992E-08$ kg CO₂ m⁻² s⁻¹ erbrachte für α keine Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt der Mattennährlösung. Dagegen zeigte P_{\max} einen Anstieg bis einschließlich 4,06E-05 kg N l⁻¹ (41 mg N l⁻¹), um dann bei höheren Stickstoffgehalten langsam wieder abzufallen. Dieses Maximum korrespondierte mit dem der apparenten Netto-CO₂-Austauschrate. Die Abhängigkeit von P_{\max} konnte mit einem Polynom dritten Grades beschrieben werden (Abb. 38). Der Abbildung konnte man entnehmen, dass

das Optimum der Nährstoffversorgung bei Einsatz der hier verwendeten Nährlösung bei einem Stickstoff-Referenzgehalt in der Mattenlösung im Bereich von $4,06\text{E-}05$ bis $1,50\text{E-}04 \text{ kg N l}^{-1}$ lag, was Nitratgehalten von 180 bis $660 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ entsprach.

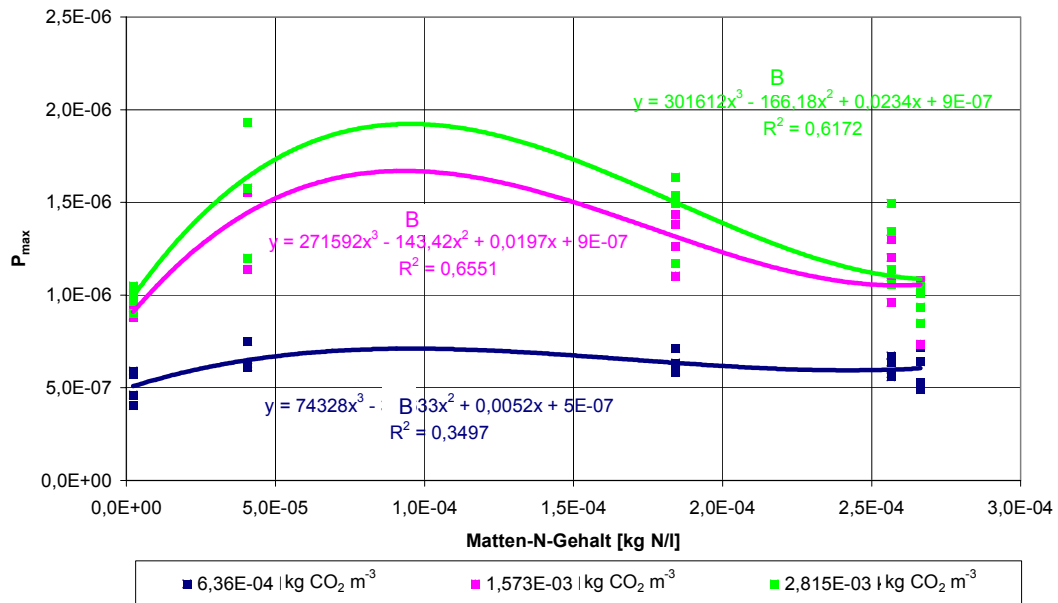


Abb. 38: Photosyntheseparameter P_{\max} nach Anpassung der apparenten Netto- CO_2 -Austauschraten an Gleichung (9) in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt der Mattennährlösung bei verschiedenen CO_2 -Konzentrationen der Luft und einer Lufttemperatur von 20°C .

5.11.5 Wasserdampfsättigungsdefizit

Das Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft errechnet sich aus dem Stoffmengenanteil des Wasserdampfes in der Luft in unmittelbarer Nähe der Blattoberfläche, dem innerhalb des Blattes, dem Gesamtdruck und der Blatttemperatur. Die Transpirationsrate steht in Beziehung mit dem ALVPD, da die Diffusion des Wasserdampfes vom Konzentrationsgradienten abhängig ist (VON WILLERT et al., 1995). Ein weiterer Einfluss des ALVPD wirkt auf die Öffnung der Stomata, wobei sich die Pflanze bei hohen Werten durch Schließen derselben gegen erhöhten Wasserverlust schützt (JONES, 1992). Die Öffnung der Stomata wirkt sich wiederum auf die Wasserdampf- und CO_2 -Leitfähigkeiten aus, wodurch die Transpirations- und CO_2 -Austauschraten beeinflusst werden (VON WILLERT et al., 1995).

Bei Messungen mit dem HCM-1000 wurde das Wasserdampfsättigungsdefizit ALVPD [Pa kPa^{-1}] zu jedem Messpunkt automatisch berechnet. Der Einfluss des ALVPD auf die Netto- CO_2 -Austausch- und Transpirationsraten sowie die Wasserdampfleitfähigkeit sollte untersucht werden. Dabei lieferte letztere einen Hinweis auf den Öffnungsgrad der Stomata, da der Grenzsichtwiderstand innerhalb der Messküvette mit einem Fächer auf ein Minimum gesenkt wurde.

Die Messungen der apparenten Netto- CO_2 -Austauschraten in Abhängigkeit von unterschiedlichen Temperaturen und Einstellungen des Entfeuchtungsventils des HCM-1000 wurden bei einer CO_2 -Konzentration von $6,36\text{E-}04 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3}$ (350 ppm) und einer Einstrahlungsintensität von 110 W m^{-2} PAR durch unterschiedliche ALVPD-Werte beeinflusst. Bei allen Temperatureinstellungen bedingten höhere ALVPD-Werte exponentiell abnehmende apparente Netto- CO_2 -Austauschraten (Abb. 39). Die maximalen Austauschraten stiegen dabei mit zunehmender Tempera-

tur an, wobei der Unterschied zwischen 20 und 30 °C geringer war als zwischen 10 und 20 °C. Die Abweichungen zwischen den Temperaturmessreihen ergaben sich aus dem Zeitpunkt des exponentiellen Abfalls der apparenten Netto-CO₂-Austauschrate in Abhängigkeit vom ALVPD. Bei 10 °C begann dieser bei einem ALVPD-Wert von rund 7 Pa kPa⁻¹, bei 20 °C bei 13 Pa kPa⁻¹ und bei 30 °C bei 18 Pa kPa⁻¹.

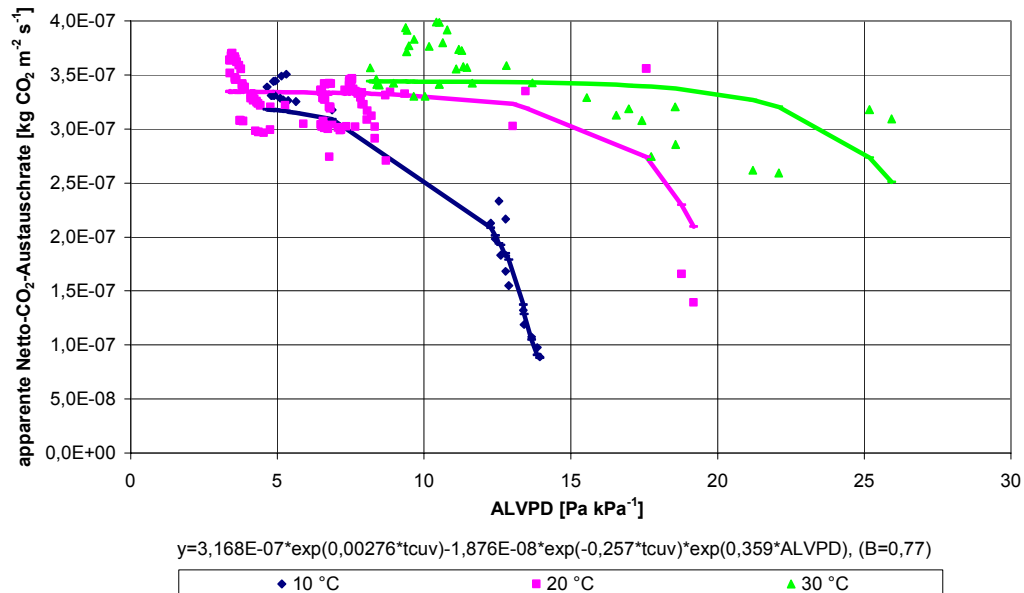


Abb. 39: Apparente Netto-CO₂-Austauschrate von *Gerbera jamesonii* 'Moana' bei 110 W m⁻² PAR Einstrahlungsintensität in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (t_{cuv}) und dem Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft gegenüber dem Blattinneren (ALVPD) bei einer mittleren CO₂-Konzentration der Luft von 6,36E-04 kg CO₂ m⁻³ (350 ppm) (Anhang D, Tab. 15).

Das ALVPD ist bei konstanten Außendruckverhältnissen und uneingeschränkter Wasserverfügbarkeit hauptsächlich abhängig von der Blattoberfläche und dem Stoffanteil an Wasserdampf in der Luft. Ausgehend von dem Ziel, bei der Erstellung des Modells nur von Klimaparametern auszugehen, die in der Praxis auf einfache Art erfasst werden können, wurde versucht, das ALVPD mit Hilfe der Messgrößen Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit über eine Regressionsgleichung abzuschätzen. Anhand von Abb. 40 wird deutlich, dass die Beziehung beider Messgrößen zum ALVPD mit einem kombinierten Polynom zweiten Grades für die Temperatur und einer linearen Gleichung für die relative Luftfeuchtigkeit dargestellt werden konnte (B=0,95).

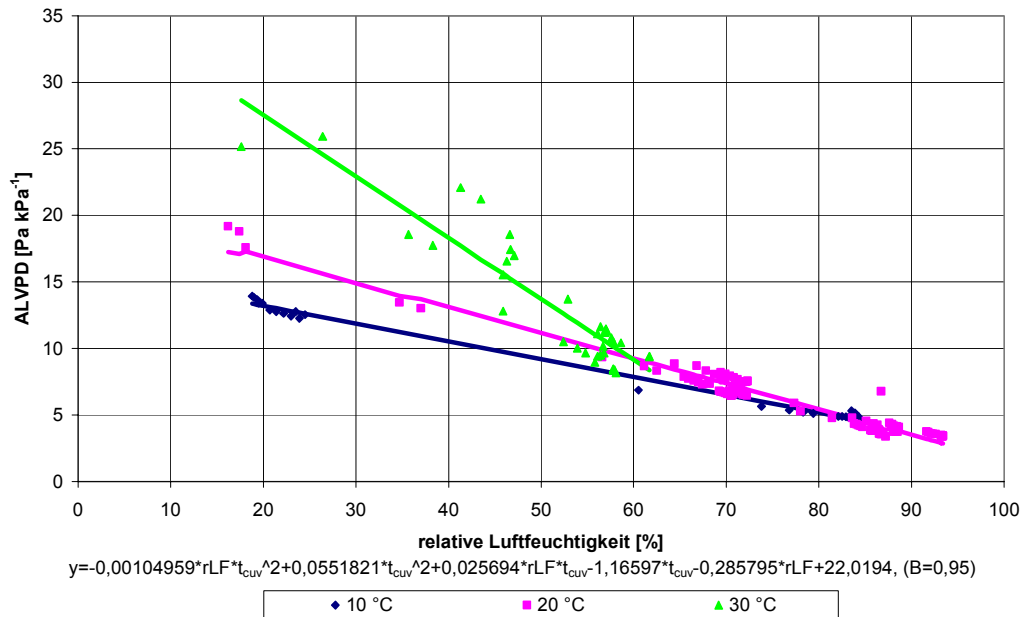


Abb. 40: Berechnung des Wasserdampfsättigungsdefizites der Luft gegenüber dem Blattinneren (ALVPD) als kombiniertes Polynom zweiten Grades in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (t_{cuv}) und der relativen Luftfeuchtigkeit (rLF) (Anhang D, Tab. 15).

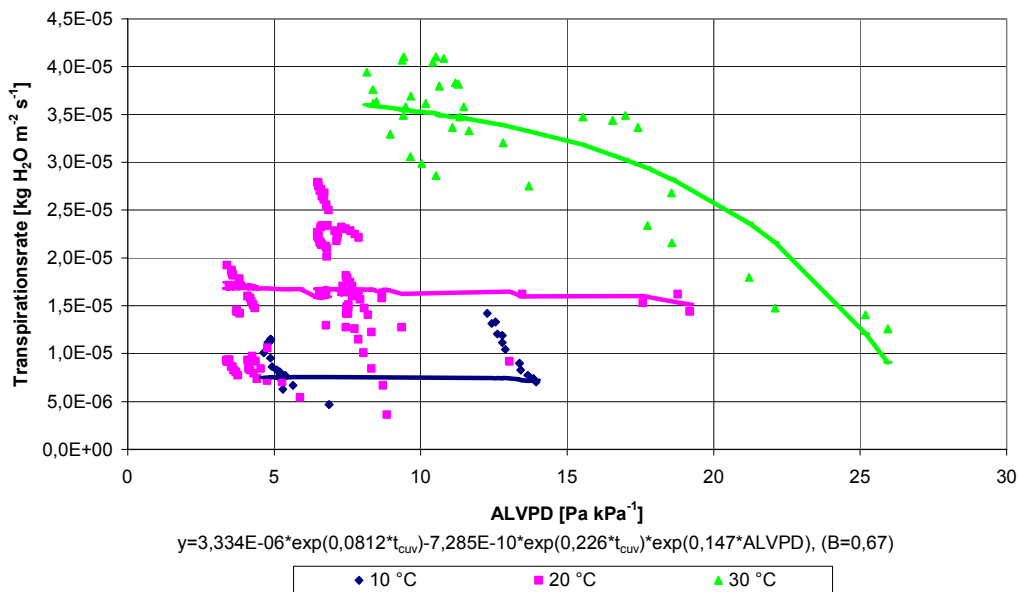


Abb. 41: Transpirationsrate von *Gerbera jamesonii* 'Moana' bei 110 W m^{-2} PAR Einstrahlungsintensität in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (t_{cuv}) und dem Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft gegenüber dem Blattinneren (ALVPD) bei einer mittleren CO_2 -Konzentration der Luft von $6,36E-04 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3}$ (350 ppm) (Anhang D, Tab. 15).

Der Einfluss des ALVPD auf die Transpirationsrate war nur bei 30 °C ausreichend ausgeprägt, um einen Abfall bei höheren ALVPD-Werten nachweisen zu können. Bei 10 und 20 °C waren die ALVPD-Werte nicht hoch genug, um eine Reduktion der Transpirationsrate wiederzugeben. Dennoch konnte eine multiplikative Exponentialgleichung an die Daten angepasst werden, die den Zusammenhang zwischen ALVPD und Transpirationsrate in Abhängigkeit von der Temperatur mit dem Bestimmtheitsmaß $B=0,67$ beschrieb (Abb. 41).

Die Wechselwirkung des ALVPD mit der Wasserdampfleitfähigkeit konnte mit einer kombinierten Exponentialgleichung in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt werden (Abb. 42). Mit zunehmenden ALVPD nahm die Wasserdampfleitfähigkeit ab und mit steigenden Temperaturen zu. Eine abnehmende Wasserdampfleitfähigkeit war in diesem Fall gleichbedeutend mit sich schließenden Stomata, da in der Messküvette aufgrund des Fächers der Grenzschichtwiderstand auf ein Minimum gesenkt wurde.

Aus der Gegenüberstellung von Wasserdampfleitfähigkeit, die über einen Multiplikator von 0,624 in die CO_2 -Leitfähigkeit umgerechnet werden konnte (VON WILLERT et al., 1995), und der apparenten Netto- CO_2 -Austauschrate war ersichtlich, dass die Photosynthese unterhalb einer Leitfähigkeit von $2,0\text{E-}03 \text{ kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ zunehmend eingeschränkt wurde, und zwar umso stärker je niedriger die Temperatur war (Abb. 43).

Für die Praxis ergab sich daraus der Hinweis, dass sich relative Luftfeuchtigkeiten über 60 % günstig auf die Photosynthese- und Transpirationsleistungen durch eine Förderung der Öffnung der Stomata auswirken. Aufgrund der höheren Netto- CO_2 -Aufnahme werden mehr energiereiche Kohlenstoffverbindungen gebildet und durch die höhere Transpiration die Wasseraufnahme verbessert, so dass das Wachstum der Pflanzen gefördert werden sollte.

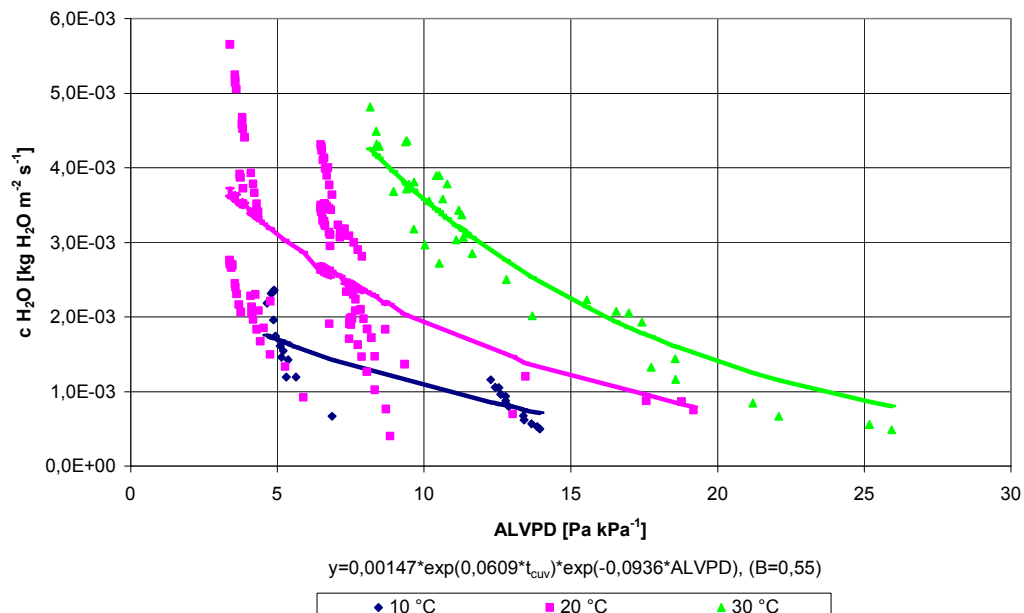


Abb. 42: Wasserdampfleitfähigkeit ($c\text{H}_2\text{O}$) von *Gerbera jamesonii* 'Moana' bei 110 W m^{-2} PAR Einstrahlungsintensität in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (t_{cuv}) und dem Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft gegenüber dem Blatinnen (ALVPD) bei einer mittleren CO_2 -Konzentration der Luft von $6,36\text{E-}04 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3}$ (350 ppm) (Anhang D, Tab. 15).

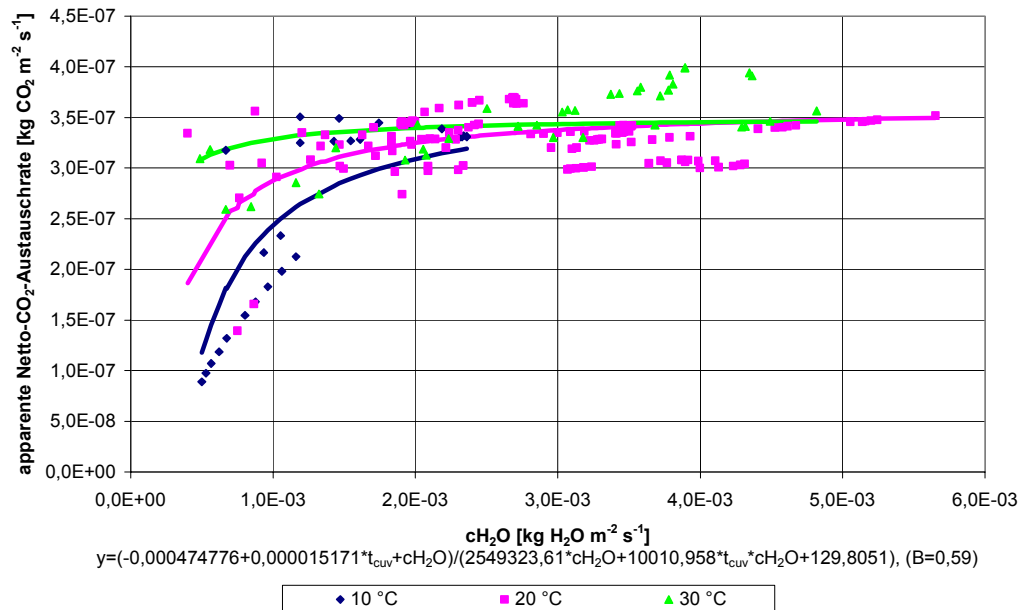


Abb. 43: Apparente Netto-CO₂-Austauschrate von *Gerbera jamesonii* 'Moana' bei 110 W m⁻² PAR Einstrahlungsintensität in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (t_{cuv}) und der Wasserdampfleitfähigkeit (c_{H_2O}) bei einer mittleren CO₂-Konzentration der Luft von 6,36E-04 kg CO₂ m⁻³ (350 ppm) (Anhang D, Tab. 15).

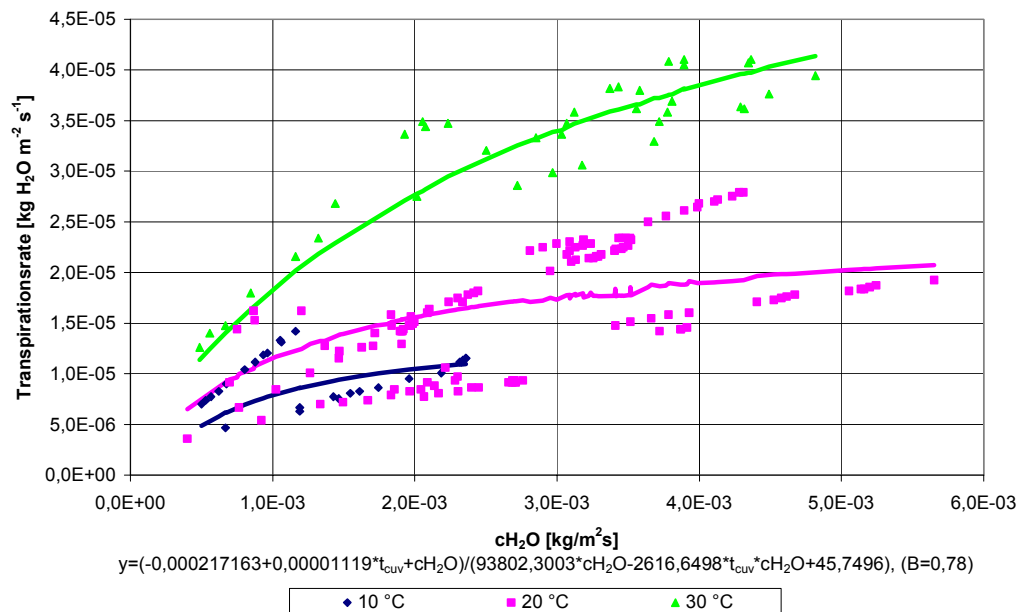


Abb. 44: Transpirationsrate von *Gerbera jamesonii* 'Moana' bei 110 W m⁻² PAR Einstrahlungsintensität in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (t_{cuv}) und der Wasserdampfleitfähigkeit (c_{H_2O}) bei einer mittleren CO₂-Konzentration der Luft von 6,36E-04 kg CO₂ m⁻³ (350 ppm) (Anhang D, Tab. 15).

Während die apparente Netto-CO₂-Austauschrate ab Wasserdampfleitfähigkeiten zwischen 2,0E-03 und 3,0E-04 kg H₂O m⁻² s⁻¹ bei allen drei geprüften Temperaturen ein maximales Niveau erreichte, stieg die Transpirationsrate bei 20 und 30 °C weiterhin an (Abb. 44).

Bezugnehmend auf die Modellfunktion zur Berechnung der Netto-CO₂-Austauschrate enthielten die Definitionen der Parameter θ und P_{max} den physikali-

schen Diffusionswiderstand für CO₂, r_d , der auf dem reziproken Wert der CO₂-Leitfähigkeit beruhte. Daher wurden die Parameter θ und P_{\max} für die Messreihen in Abhängigkeit des ALVPD mit Hilfe von Gleichung (9) berechnet.

Die Werte des Parameters θ zeigten eine hohe Variabilität, jedoch konnten Annäherungswerte errechnet werden, die einen linearen Anstieg mit zunehmender Wasserdampfleitfähigkeit und abnehmendem ALVPD aufwiesen. Die Abhängigkeit von der Temperatur konnte mit einem Polynom zweiten Grades beschrieben werden (Abb. 45). Für den Parameter P_{\max} wurde bei 20 und 30 °C im Gegensatz zur Messreihe bei 10 °C, bei der ein Abfall von P_{\max} mit zunehmendem ALVPD zu sehen war, jeweils nur ein geringer Einfluss festgestellt. Dennoch ließ sich deren Einfluss in Kombination mit dem ALVPD mit Hilfe einer kombinierten Gleichung in Abhängigkeit von der Temperatur bei einem Bestimmtheitsmaß von $B=0,97$ darstellen (Abb. 46).

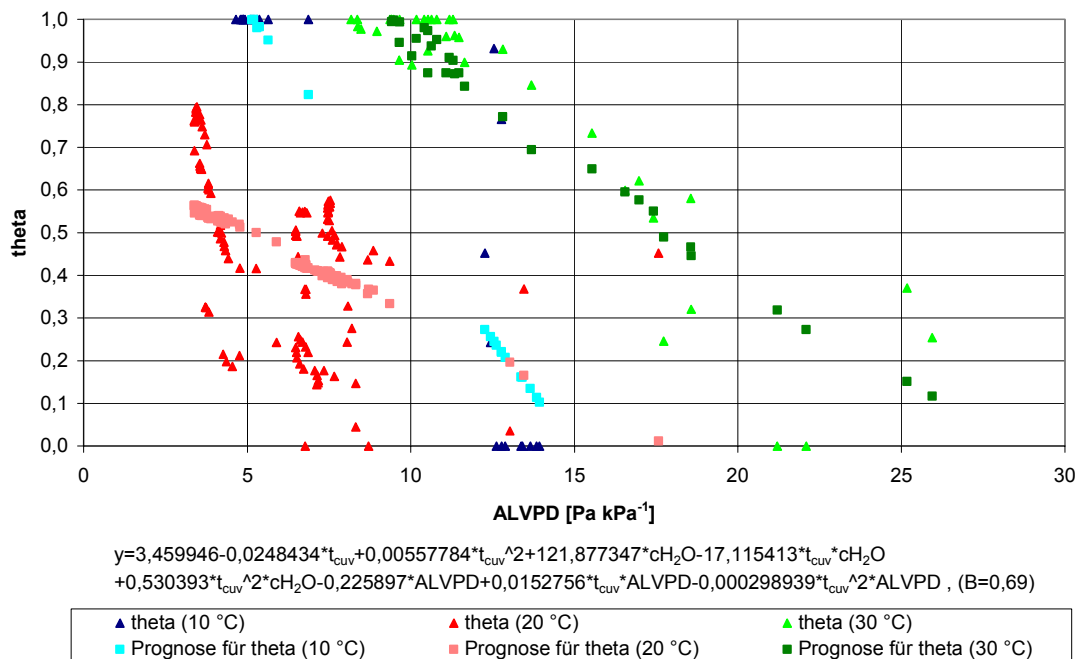


Abb. 45: Berechnung des Photosyntheseparameters θ (theta) in Abhängigkeit von der Wasserdampfleitfähigkeit (cH_2O), der Lufttemperatur (t_{cuV}) und dem Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft gegenüber dem Blattinneren (ALVPD).

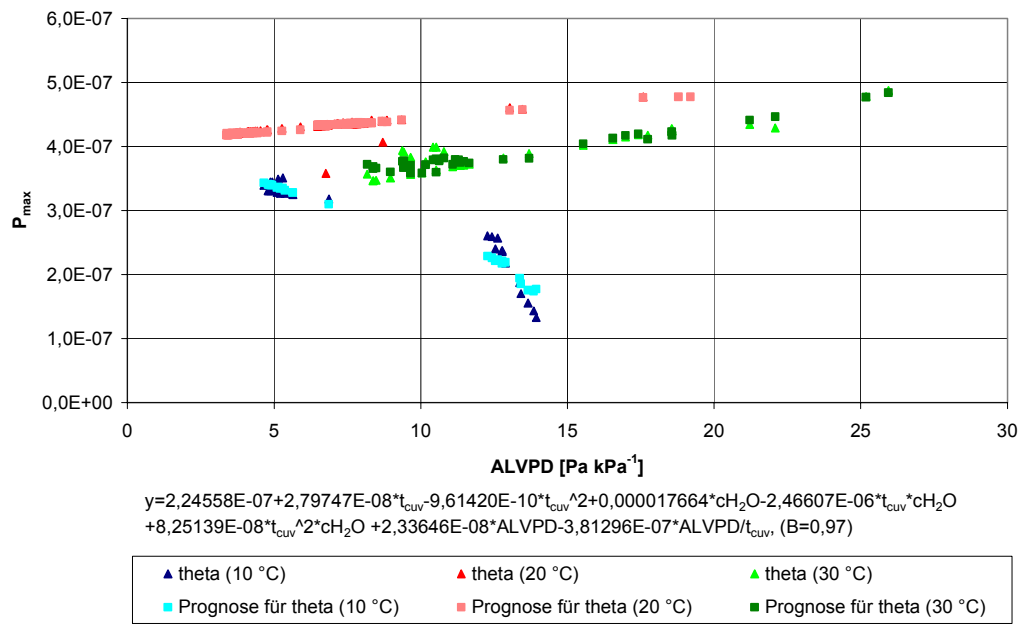


Abb. 46: Berechnung des Photosyntheseparameters P_{\max} in Abhängigkeit von der Wasserdampfleitfähigkeit (cH_2O), der Lufttemperatur (t_{cuV}) und dem Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft gegenüber dem Blatinnenen (ALVPD).

5.11.6 Wasserversorgung in der Steinwollmatte

Ziel dieser Messreihe war es, den Einfluss der Feuchtigkeit in der Steinwollmatte auf das ALVPD, die Öffnung der Stomata und damit auch auf die apparenten Netto- CO_2 -Austausch- und Transpirationsraten zu überprüfen.

Die Tendenz des ALVPD mit steigenden Saugspannungswerten größer zu werden, wurde mit einem Bestimmtheitsmaß von $B=0,27$ nicht bestätigt (Abb. 47). Ein Grund für die Schwankungen des ALVPD lag in der Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit, die bei gleicher Einstellung des Entfeuchtungsventils des Messgerätes mit einer Standardabweichung von 13,6 um einen Mittelwert von 72,6 % schwankte.

Die Auswirkung der sinkenden Mattenfeuchtigkeit und damit steigender Saugspannung auf die Wasserdampfleitfähigkeit war deutlicher. Mit zunehmender Saugspannung fiel die Wasserdampfleitfähigkeit exponentiell ab, was unter der Voraussetzung eines in der Messküvette minimierten Grenzschichtwiderstandes einer zunehmenden Schließung der Stomata bei reduzierter Wasserverfügbarkeit gleichkam (Abb. 48). Der Einfluss des ALVPD war, wie in Abschnitt 5.11.5 gezeigt, zum Teil verantwortlich für das Schließen der Stomata, jedoch musste dem Einfluss des geringeren Wasserangebotes und damit dem niedrigeren Wasserpotential in den Pflanzen eine bedeutendere Rolle zugeschrieben werden (VON WILLERT et al., 1995). Die Abhängigkeit der sinkenden Wasserdampfleitfähigkeit von der Saugspannung in der Steinwollmatte und vom ALVPD wurde nach Anpassung einer kombinierten Exponentialfunktion deutlich. Die Abweichungen der Wasserdampfleitfähigkeit von der einfachen Exponentialfunktion in Abhängigkeit von der Saugspannung wurden durch eine Erweiterung für den Einfluss des ALVPD mit einem Bestimmtheitsmaß von $B=0,82$ weitgehend geklärt.

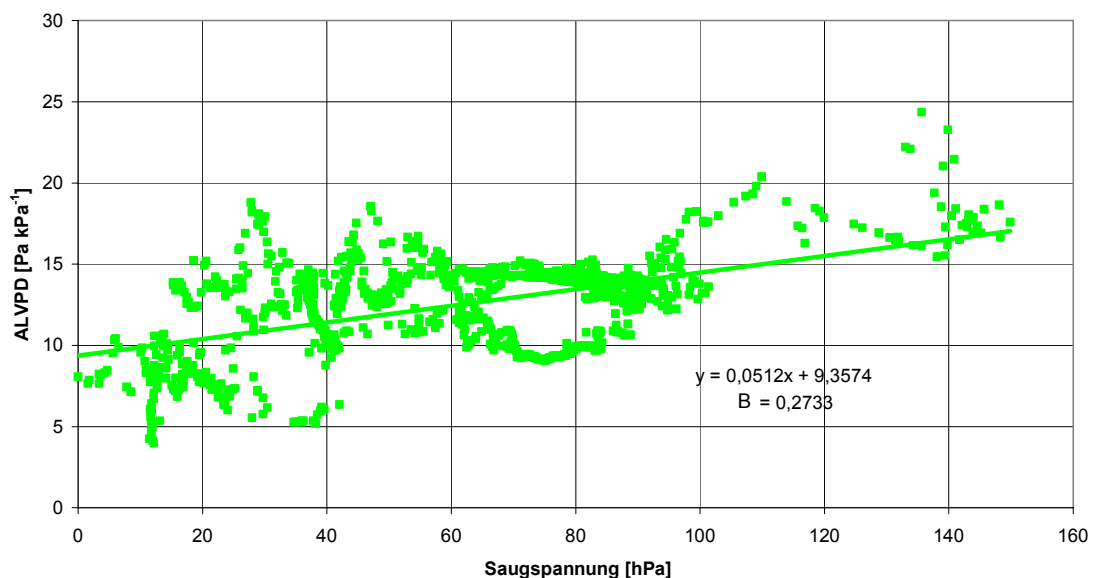


Abb. 47: Verlauf des Wasserdampfsättigungsdefizites der Luft gegenüber dem Blattinneren (ALVPD) bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 73 % und einer Lufttemperatur von 20 °C.

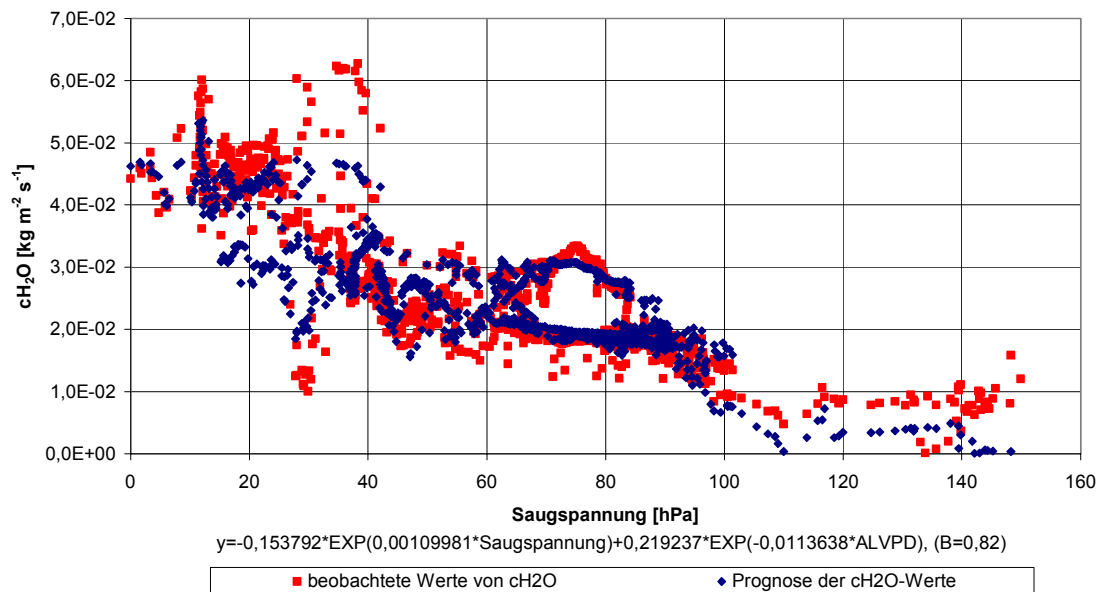


Abb. 48: Wasserdampfleitfähigkeit (c_{H_2O}) von *Gerbera jamesonii* 'Moana' in Abhängigkeit von der Saugspannung in der Steinwollmatte und dem Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft gegenüber dem Blattinneren (ALVPD) bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 73 % und einer Lufttemperatur von 20 °C.

Als Folge der abnehmenden Wasserverfügbarkeit bei steigender Saugspannung verringerten sich analog zur Wasserdampfleitfähigkeit die Netto- CO_2 -Austausch- und Transpirationsraten exponentiell (Abb. 49 und 50). Eine Gegenüberstellung der Gas-Austauschraten mit der Wasserdampfleitfähigkeit offenbarte, dass ein linearer Zusammenhang zwischen den Variablen bestand. Dieser konnte bei Berücksichtigung des ALVPD in einer kombinierten linearen/exponentiellen Funktion mit Bestimmtheitsmaßen von $B=0,74$ für die Netto- CO_2 -Austauschrate und $B=0,94$ für die Transpirationsrate dargestellt werden (Abb. 51 und 52).

In dieser Messreihe ergaben sich höhere apparente Netto- CO_2 -Austauschraten als in der vergleichbaren Messreihe in Abschnitt 5.11.5. Zudem wurde für die Abhängigkeit von der Wasserdampfleitfähigkeit im Gegensatz zur hier beschriebenen linearen Abhängigkeit ein sich sättigender hyperbolischer Verlauf angenommen. Die höheren apparenten Netto- CO_2 -Austauschraten resultierten aus der höheren Einstrahlungsintensität von 226 W m^{-2} gegenüber 113 W m^{-2} bei der Messreihe in Abschnitt 5.11.5. Hinsichtlich des angenommenen linearen Anstieges der Netto- CO_2 -Austauschrate in Abhängigkeit der Wasserdampfleitfähigkeit (Abb. 43) schien auch in der hier beschriebenen Untersuchung eine Sättigung ab einer Leitfähigkeit von $0,04 \text{ kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erreicht zu werden, die sich jedoch aufgrund der geringen Datendichte über diesen Wert hinaus nicht in Form einer hyperbolischen Sättigungsfunktion darstellte. Analoge Aussagen trafen auf den Verlauf der Transpirationsrate zu.

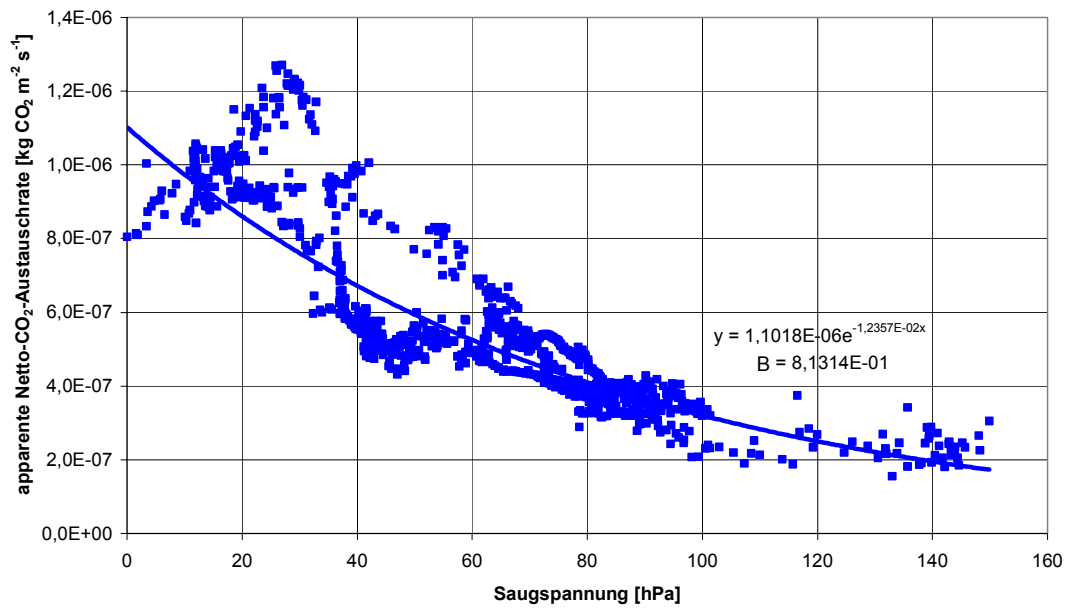


Abb. 49: Apparente Netto-CO₂-Austauschrate bei zunehmender Saugspannung in der Steinwollmatte bei einer relativen Luftfeuchtigkeit um 73 % und einer Lufttemperatur von 20 °C.

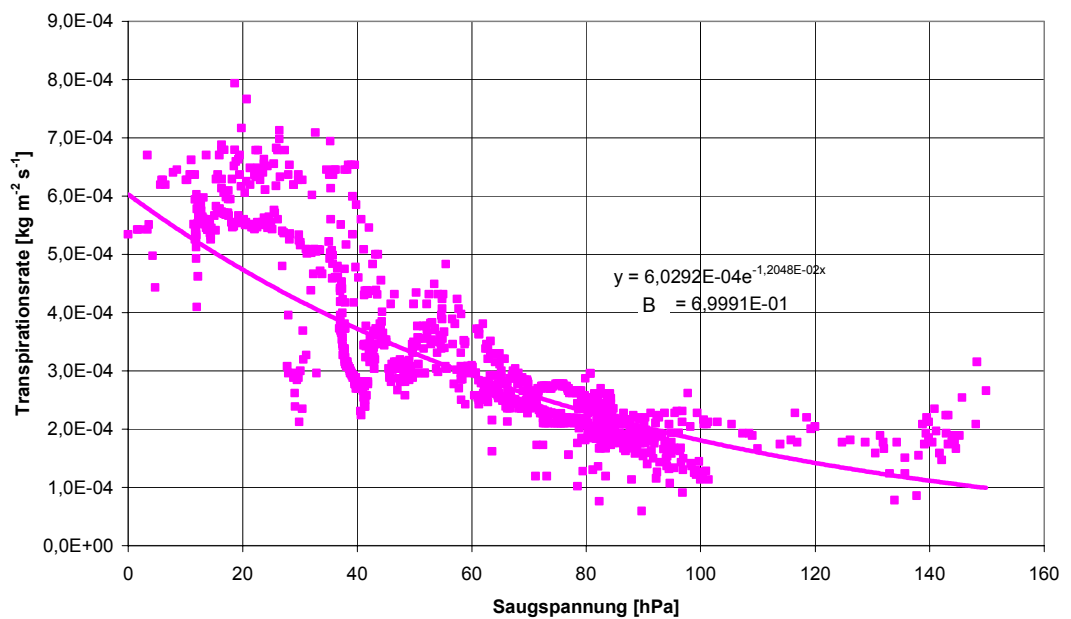


Abb. 50: Apparente Transpirationsrate bei zunehmender Saugspannung in der Steinwollmatte bei einer relativen Luftfeuchtigkeit um 73 % und einer Lufttemperatur von 20 °C.

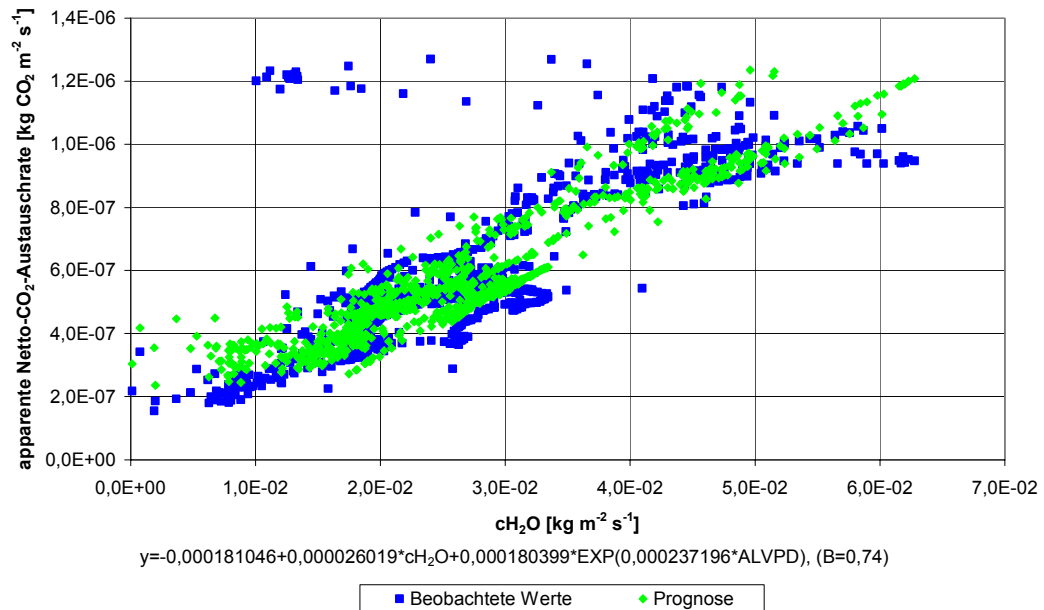


Abb. 51: Apparente Netto-CO₂-Austauschrate in Abhängigkeit von der Wasserdampfleitfähigkeit (cH₂O) und dem Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft gegenüber dem Blattinneren (ALVPD) bei einer relativen Luftfeuchtigkeit um 73 % und einer Lufttemperatur von 20 °C.

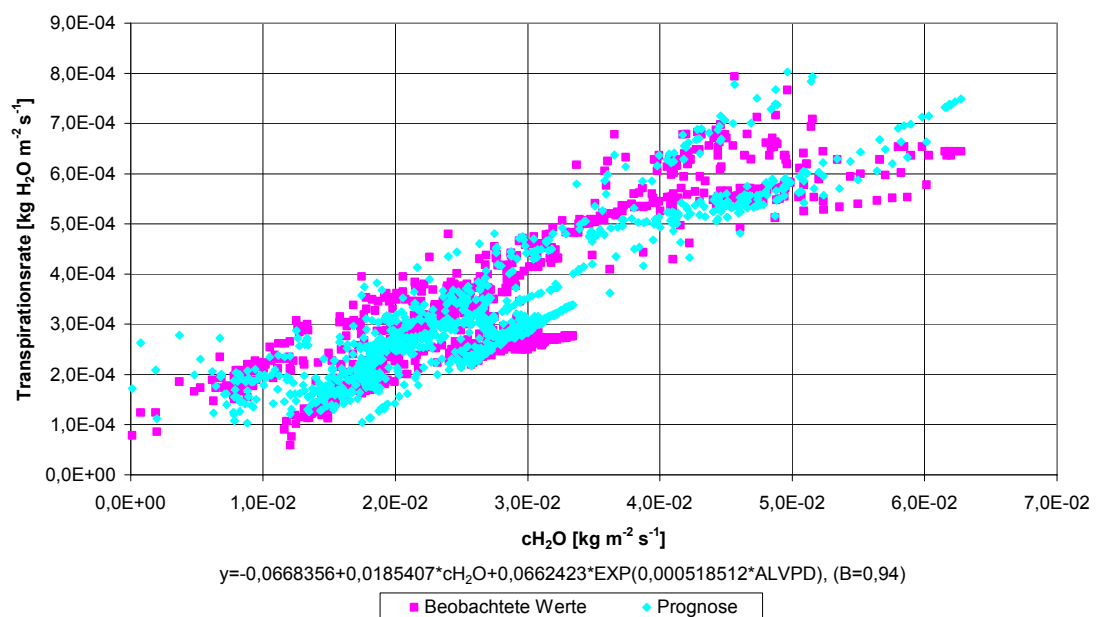


Abb. 52: Apparente Transpirationsrate in Abhängigkeit von der Wasserdampfleitfähigkeit (cH₂O) und dem Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft gegenüber dem Blattinneren (ALVPD) bei einer relativen Luftfeuchtigkeit um 73 % und einer Lufttemperatur von 20 °C.

5.11.7 Zusammenfassung der Photosyntheseparameter

Für das Modell mussten die Parameter, die bei der Berechnung der Netto- CO_2 -Austauschraten in Gleichung (9) Verwendung fanden, in Abhängigkeit von den externen Klima- und Wachstumsfaktoren definiert werden. Klima- und Wachstumsfaktoren, die in der Kultur zur Verfügung standen oder ermittelt wurden, waren Lufttemperatur, Einstrahlung, CO_2 -Konzentration der Luft, relative Luftfeuchtigkeit, Stickstoffgehalt in der Mattennährlösung und Mattenfeuchtigkeit in Form der Saugspannung. Das ALVPD ergab sich wie gezeigt aus der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit sowie die Wasserdampfleitfähigkeit aus dem ALVPD und der Saugspannung (Abb. 40 und 48). Die Einstrahlung wurde für die Definition der Parameter nicht benötigt, da sie die Berechnungsgrundlage der Netto- CO_2 -Austauschrate in Gleichung (9) darstellte. Das mittlere Alter der Blätter floss in die Modellberechnungen ein, so dass die Abhängigkeit der Photosyntheseparameter vom Blattalter in der Definition berücksichtigt wurde.

Im Folgenden gingen die in den Abschnitten 5.11.1 bis 5.11.5 ermittelten Photosyntheseparameter in Kombination mit den dazugehörigen Klima- und Wachstumsfaktoren in die Regressionsanalysen ein. Dabei wurden Gleichungen, die sich aus dem Zusammenschluss der zuvor ermittelten ergaben, an die Ergebnisse aller Testreihen angepasst. Es resultierten mathematische Funktionen als Basis für die Berechnung der Photosyntheseparameter innerhalb des Modells (Abb. 53 bis 57).

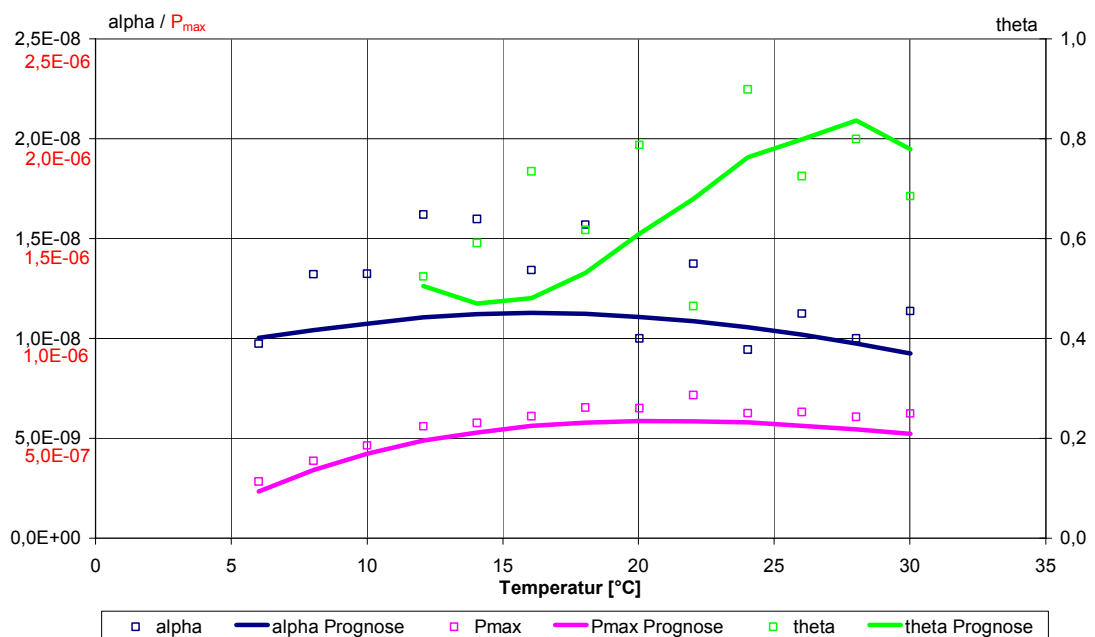


Abb. 53: Prognose der Photosyntheseparameter α , P_{\max} und θ mit Hilfe der allgemeinen Gleichungen (10), (11) und (12) in Abhängigkeit von der Temperatur im Vergleich zu den in Abschnitt 5.11.1 ermittelten Werten für α , P_{\max} und θ unter Einbeziehung der entsprechenden Klima- und Wachstumsparameter.

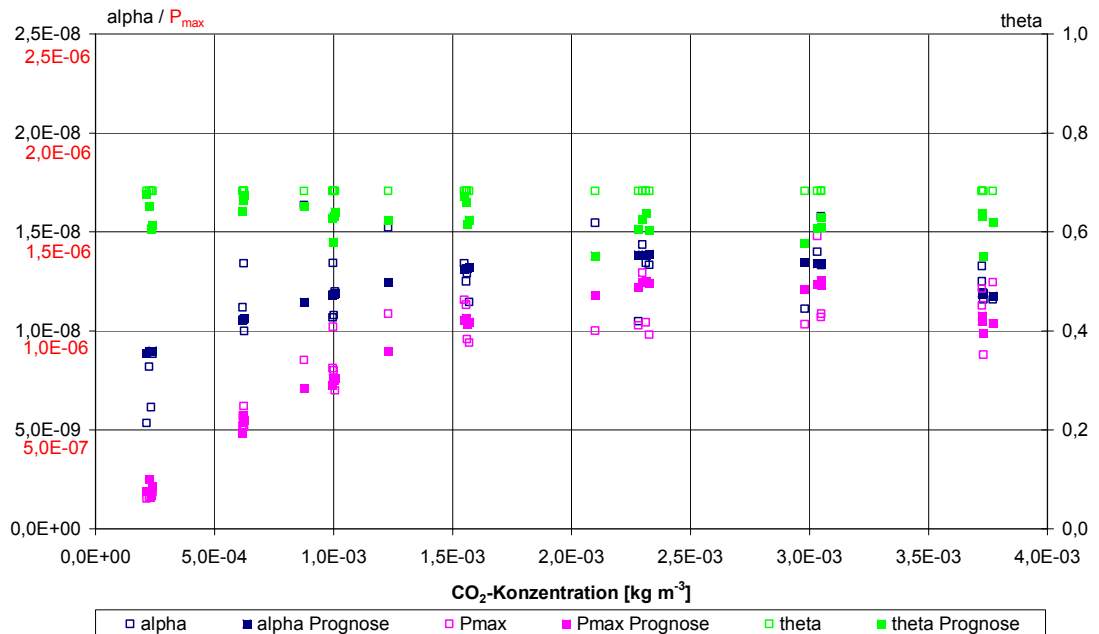


Abb. 54: Prognose der Photosyntheseparameter α , P_{\max} und θ mit Hilfe der allgemeinen Gleichungen (10), (11) und (12) in Abhängigkeit von der CO₂-Konzentration der Luft im Vergleich zu den in Abschnitt 5.11.2 ermittelten Werten für α , P_{\max} und θ unter Einbeziehung der entsprechenden Klima- und Wachstumsparameter.

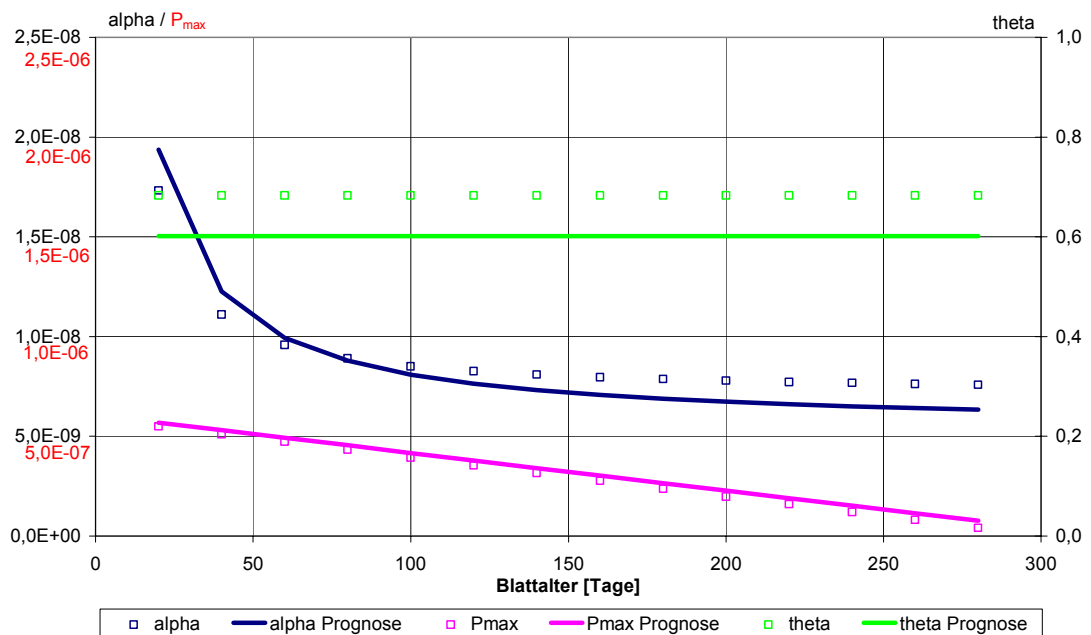


Abb. 55: : Prognose der Photosyntheseparameter α , P_{\max} und θ mit Hilfe der allgemeinen Gleichungen (10), (11) und (12) in Abhängigkeit vom Blattalter bei 20 °C Lufttemperatur im Vergleich zu den in Abschnitt 5.11.3 ermittelten Werten für α , P_{\max} und θ unter Einbeziehung der entsprechenden Klima- und Wachstumsparameter.

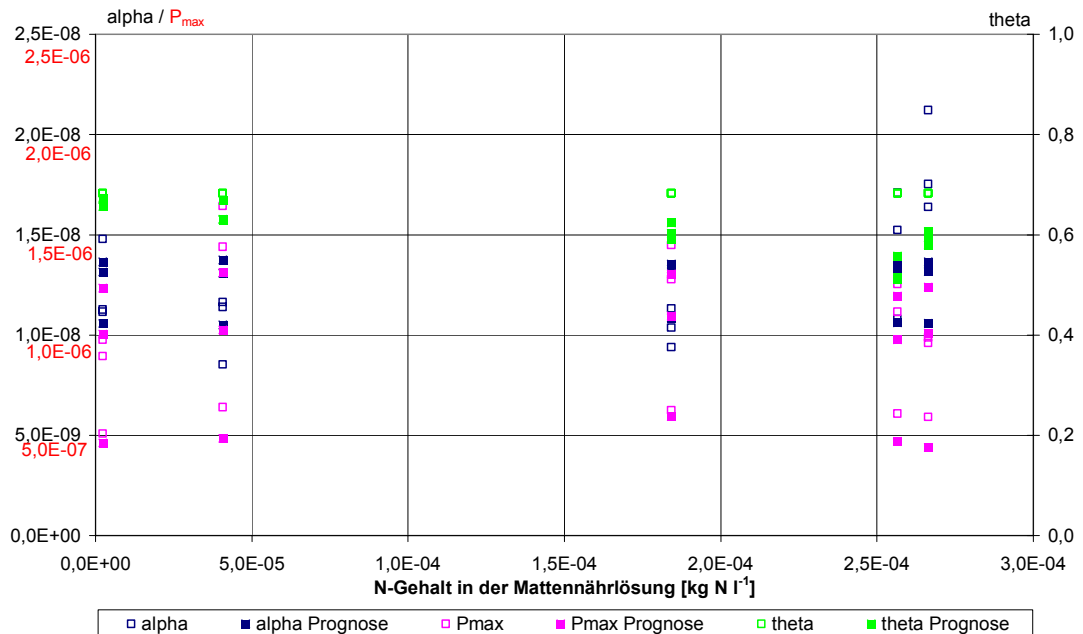


Abb. 56: : Prognose der Photosyntheseparameter α , P_{\max} und θ mit Hilfe der allgemeinen Gleichungen (10), (11) und (12) in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt der Mattennährlösung im Vergleich zu den in Abschnitt 5.11.4 ermittelten Werten für α , P_{\max} und θ unter Einbeziehung der entsprechenden Klima- und Wachstumsparameter.

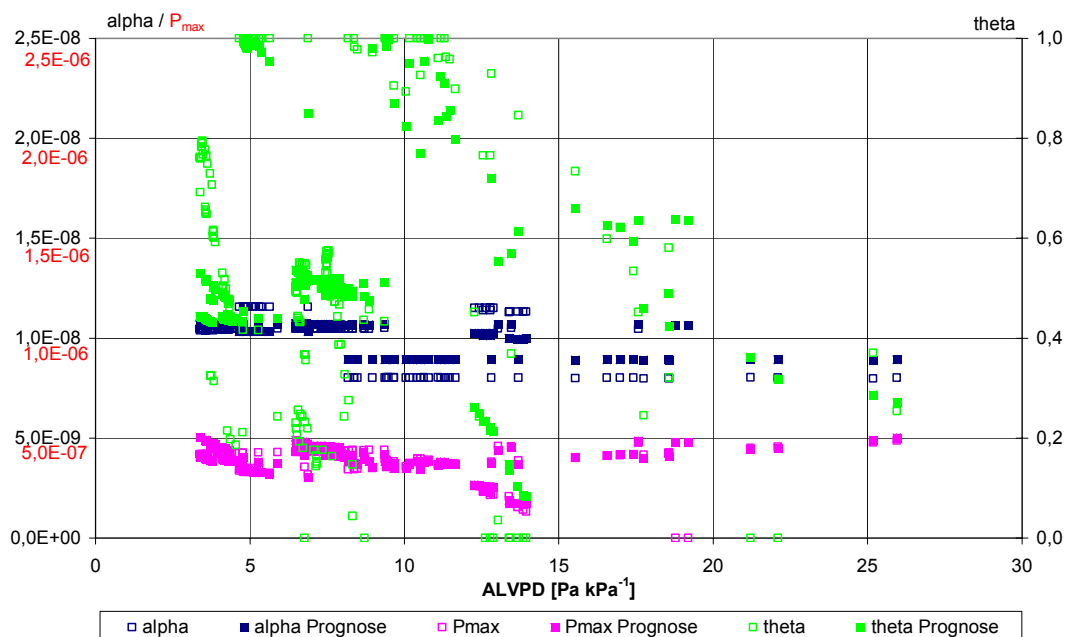


Abb. 57: Prognose der Photosyntheseparameter α , P_{\max} und θ mit Hilfe der allgemeinen Gleichungen (10), (11) und (12) in Abhängigkeit vom Wasserdampf-sättigungsdefizit der Luft gegenüber dem Blattinneren (ALVPD) im Vergleich zu den in Abschnitt 5.11.5 ermittelten Werten für α , P_{\max} und θ unter Einbeziehung der entsprechenden Klima- und Wachstumsparameter.

Nicht alle Wachstumsfaktoren waren in jeder Gleichung enthalten, da eine Abhängigkeit der Parameter nicht von jedem Faktor vorlag oder nachgewiesen werden konnte. Die Kombination der Regressionsgleichungen für die einzelnen Faktoren führte zu folgenden Gleichungssystemen für die Photosyntheseparameter:

$$\alpha = k_{\alpha} + a_{\alpha 1} \cdot \exp \left| \frac{a_{\alpha 2}}{X_1} \right| + t_{\alpha 1} \cdot X_2 + t_{\alpha 2} \cdot X_2^2 + c_{\alpha 1} \cdot X_3 + c_{\alpha 2} \cdot X_3^2 \quad (10)$$

$$P_{\max} = k_p + a_p \cdot X_1 + t_{p1} \cdot X_2 + t_{p2} \cdot X_2^2 + c_{p1} \cdot X_3 + c_{p2} \cdot X_3^2 + n_{p1} \cdot X_4 + n_{p2} \cdot X_4^2 + n_{p3} \cdot X_4^3 \\ + l_{p1} \cdot X_5 + l_{p2} \cdot X_2 \cdot X_5 + l_{p3} \cdot X_2^2 \cdot X_5 + w_{p1} \cdot X_6 + w_{p2} \cdot \frac{X_6}{X_2} \quad (11)$$

$$\theta = k_{\theta} + (t_{\theta 1} + l_{\theta 1} \cdot X_5 + w_{\theta 1} \cdot X_6) \cdot X_2 + (t_{\theta 2} + l_{\theta 2} \cdot X_5 + w_{\theta 2} \cdot X_6) \cdot X_2^2 + l_{\theta 3} \cdot X_5 + w_{\theta 3} \cdot X_6 \quad (12)$$

$$R_d = k_r \cdot \exp \left| \frac{a_r}{X_1} \right| \quad (13)$$

wobei X_1 = mittleres Blattalter [Tage]
 X_2 = Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
 X_3 = CO_2 -Konzentration [$\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-3}$]
 X_4 = Stickstoffkonzentration der Nährlösung in der Matte [kg N l^{-1}]
 X_5 = Wasserdampfleitfähigkeit [$\text{kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
 X_6 = Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft, ALVPD [Pa kPa^{-1}] war.

Tab. 4: Leitfähigkeitswerte und NO_3 -Gehalte der Nährlösungen, die bei der Versuchsreihe zur Ermittlung der Wurzelatmung von *Gerbera jamesonii* 'Moana' während der Gaswechsellmessungen verwendet wurden.

α		P_{\max}		θ		R_d	
k_{α}	-1,99554E-07	k_p	-3,35979E-07	k_{θ}	4,06335E-00	k_r	1,94390E-08
$a_{\alpha 1}$	1,98972E-07	a_p	-1,88717E-09	$t_{\theta 1}$	-3,03920E-01	a_r	4,79201E+01
$a_{\alpha 2}$	1,36057E-00	t_{p1}	1,82194E-08	$t_{\theta 2}$	5,82864E-03		
$t_{\alpha 1}$	3,57693E-10	t_{p2}	-7,11380E-10	$l_{\theta 1}$	-1,06036E+01		
$t_{\alpha 2}$	-1,04764E-11	c_{p1}	1,02904E-03	$l_{\theta 2}$	5,93697E-01		
$c_{\alpha 1}$	5,07208E-06	c_{p2}	-1,93403E-01	$l_{\theta 3}$	-1,79346E-01		
$c_{\alpha 2}$	-1,06894E-03	n_{p1}	8,75722E-04	$w_{\theta 1}$	3,32244E-02		
		n_{p2}	-4,04623E-00	$w_{\theta 2}$	-7,00237E-04		
		n_{p3}	4,55890E+03	$w_{\theta 3}$	-3,67492E-01		
		l_{p1}	1,42242E-06				
		l_{p2}	2,53810E-06				
		l_{p3}	-4,71574E-08				
		w_{p1}	2,60045E-08				
		w_{p2}	-3,19849E-07				
B	0,57	B	0,92	B	0,58	B	0,79

In Gleichung (10) zur Berechnung des Photosyntheseparameters α wurden, obwohl die Einflüsse der Temperatur und der CO_2 -Konzentration nicht zweifelsfrei

nachgewiesen werden konnten, beide Einflussgrößen einbezogen, da mit diesen ein besseres Bestimmtheitsmaß berechnet werden konnte als ohne deren Berücksichtigung.

Die über das Regressionsmodul der Statistiksoftware SPSS bestimmten Regressionskoeffizienten innerhalb der Gleichungen sowie die dazugehörigen Bestimmtheitsmaße werden in Tab. 4 wiedergegeben und belegten die Eignung zur Berechnung der Photosyntheseparameter mit Hilfe der aufgestellten mathematischen Gleichungssysteme.

5.12 Atmung

5.12.1 Sprossatmung

Die Atmung der Blatt- und Wurzelgewebe kann in Abhängigkeit vom Zweck der Energiebereitstellung in verschiedene Komponenten unterteilt werden. So wird bei Blattgeweben zwischen Erhaltungs- und Wachstumsatmung unterschieden, während bei Wurzelgeweben zusätzlich die Atmung für die Deckung des Energiebedarfs der Nährstoffaufnahme berücksichtigt wird (Abschnitt 5.12.2) (THORNLEY, 1970; JOHNSON und THORNLEY, 1985).

Anhand der Gaswechsellmessungen in Abschnitt 5.11.3 wurde ermittelt, dass die Atmung der Blätter hauptsächlich von ihrem Alter abhängig war (Abb. 35). Dabei wiesen jüngere Blätter unter 50 Tagen eine wesentlich höhere Atmung auf als ältere, was einem größeren Anteil an Wachstumsatmung zugeschrieben werden konnte. Um den Anteil an Erhaltungsatmung in Abhängigkeit vom Blattalter abzuschätzen, erfolgte die Anpassung einer linearen Regressionsgleichung an die vorhandenen Daten für Blätter über 50 Tage, die eine mit zunehmenden Blattalter rückläufige Erhaltungsatmung wiedergab (Abb. 58)

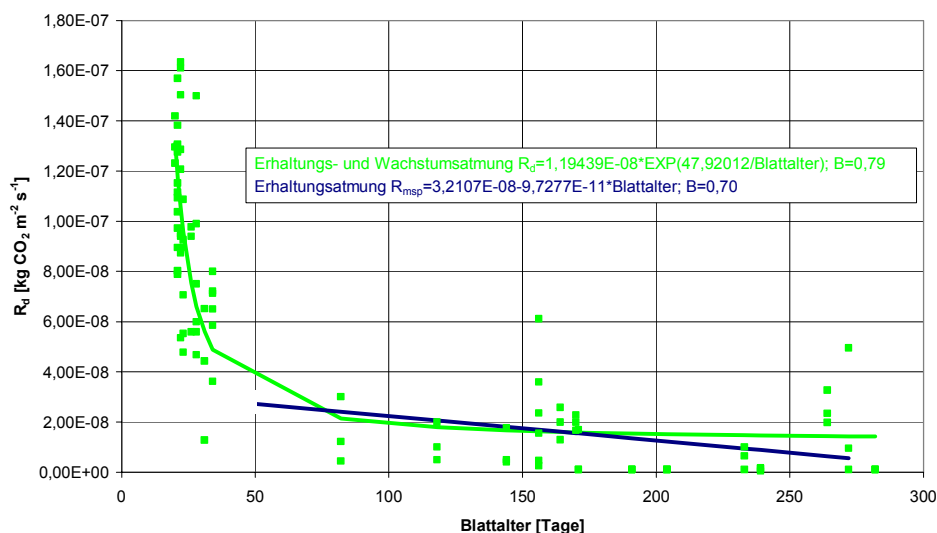


Abb. 58: Anpassung einer Exponentialfunktion an die in Abschnitt 5.11.3 berechnete Sprossatmung R_d in Abhängigkeit vom Blattalter bei einer mittleren CO_2 -Konzentration der Luft von $7,13E-04 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3}$ (390 ppm) sowie Anpassung einer linearen Funktion an die Atmungsdaten für Blätter im Alter über 50 Tage.

Im Modelldiagramm wurde die Erhaltungsatmung in Abhängigkeit vom mittleren Blattalter entsprechend dreier Blattalterskategorien mit Hilfe von Gleichung (14) berechnet.

$$\text{Erhaltungsatmung} = (p_{\text{Rmsp1}} + p_{\text{Rmsp2}} * \text{Blattalter}) * L1 * \frac{12}{44} * 86400 * \frac{W_C}{K_{\text{rm}} + W_C} \quad (14)$$

in kg C m⁻²,

mit den Regressionskoeffizienten $p_{\text{Rmsp1}} = 3,2107\text{E-}08$ und $p_{\text{Rmsp2}} = -9,7277\text{E-}11$

wobei L1 bzw. L2 oder L3 den partiellen Blattflächenindices der jeweiligen Blattalterskategorie entsprachen, 12/44 die Umwandlung von CO₂ in Kohlenstoff (C) ermöglichte, die Multiplikation mit 86400 s d⁻¹ die Atmung über 24 Stunden ergab und der hyperbolische Term in Verbindung mit dem pflanzeninternen C-Speicher W_C sicherstellte, dass in den Modellberechnungen keine negativen Werte auftreten konnten. Die Berechnung des Parameters K_{rm}=0,0049 erfolgte über die Optimierungsfunktion von ModelMaker.

Der Anteil der Wachstumsatmung bei jüngeren Blättern war aufgrund der hohen Streubreite nur ungenügend zu bestimmen. THORNLEY (1970) beschrieb einen Yield-Faktor, der die in neue Strukturmasse eingebaute C-Menge im Verhältnis zu der aus dem Speicher entnommenen darstellte. Nicht in Struktur eingebautes C wurde zur Energiegewinnung für Wachstumsprozesse veratmet. Der Yield-Faktor Y galt als konstant, wobei der im Gerbera-Modell verwendete Wert mit 0,75 den Angaben von THORNLEY (1970) und JOHNSON und THORNLEY (1985) folgte.

Die Wachstumsatmung der Blätter war abhängig von der neugebildeten Strukturmasse. Aus der Definition des Yield-Faktors Y und dem Sprosszuwachs ergab sich Gleichung (15) zur Berechnung des C-Verlustes durch Atmung beim Blattwachstum, der aus dem C-Speicher abfloss.

$$\text{Wachstumsatmung} = \text{Sproßzuwachs} * \frac{(1 - Y)}{Y} \quad (15)$$

in kg C m⁻² mit Y = 0,75

5.12.2 Wurzelatmung

Die Messungen der Wurzelatmung in Abhängigkeit der N-Konzentration in der Nährlösung wurden durchgeführt, um Basisdaten für die Anpassung einer Modellgleichung zu ermitteln. Auf der Grundlage der von JOHNSON (1985) beschriebenen Gleichung zur Abhängigkeit der N-Aufnahme von der Konzentration im Wachstumsmedium, der spezifischen Aktivität der Wurzeln und den C- und N-Konzentrationen im Speicher der Pflanzen fand folgende abgeänderte Gleichung Verwendung:

$$U_N^I = \frac{\sigma_N * N_{\text{NL}}}{1 + \frac{K_C}{C} * \left| 1 + \frac{N}{K_N} \right|} \quad (16)$$

in kg N kg⁻¹ Wurzelstrukturmasse,

wobei σ_N = Proportionalitätskonstante für die Abhängigkeit der N-Aufnahme

- von der N-Konzentration in der Nährlösung
- N_{NL} = N-Konzentration der Mattennährlösung [kg N l^{-1}]
- C = C-Konzentration im pflanzeneigenen Speicher bezogen auf das Struktur Trockengewicht [kg C kg^{-1}]
- N = N-Konzentration im pflanzeneigenen Speicher bezogen auf das Struktur Trockengewicht [kg N kg^{-1}]
- K_C = Aktivitätsparameter der Wurzel für C
- K_N = Aktivitätsparameter der Wurzel für N

JOHNSON (1985) wählte den Nenner von Gleichung (16) so, dass für die N-Aufnahme C-Verbindungen für die Energiegewinnung aus dem pflanzeneigenen Speicher benötigt wurden, wogegen hohe N-Konzentrationen im Speicher die Aufnahme von weiterem N behinderten.

Bei der Modellerstellung unterteilte sich die gesamte Trockenmasse der Pflanze daher in zwei Variablen. Zum einen in das Struktur Trockengewicht, das allein die Pflanzenstrukturmasse wiedergab, und zum anderen in das Substrattrockengewicht, das den pflanzeneigenen Speicher für C- und N-Verbindungen darstellte, die für den Aufbau von Strukturmasse oder zur Energiegewinnung notwendig waren und daher als Substrate bezeichnet wurden. Es wurden zwei Substrate unterschieden: C-Substrat, W_C [kg C kg^{-1} Gesamttrockensubstanz] und N-Substrat W_N [kg N kg^{-1} Gesamttrockensubstanz].

Für die weiteren Berechnungen benötigte das Modell Schätzwerte für C und N (Gleichung 16). Zu diesem Zweck erfolgte zum Zeitpunkt der Wurzelatmungsmessungen morgens und abends eine Entnahme von Blattmaterial vergleichbarer Pflanzen aus dem Bestand, an welchem die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt in Münster (LUFA) die löslichen Kohlenhydrate auf der Basis der Trockensubstanz analysierte (VDLUFA, 1991). Die Probenentnahme fand morgens und abends statt, da sich die Konzentrationen im pflanzeneigenen Substrat im Tagesverlauf veränderten und ein Mittelwert errechnet werden sollte.

Die N-Konzentration wurde über Nitratmessung im Presssaft von Blättern reflektometrisch ermittelt. Zur Vereinfachung der Berechnungen wurden die C- und N-Substrate in jeweils einer Form, Kohlenhydrat (CH_2O) und Nitrat (NO_3), berücksichtigt, deren molekularen Massen auf ^{12}C und ^{14}N bezogen entsprechend $M_C=30$ und $M_N=62$ betrugen (REYNOLDS und THORNLEY, 1982; THORNLEY und JOHNSON, 1990).

Der mittlere Gehalt an löslichen Kohlenhydraten in der Trockensubstanz lag bei $0,158 \text{ kg kg}^{-1}$ Trockensubstanz, woraus sich durch Multiplikation mit 12 dividiert durch 30 der Anteil an C-Substrat je kg Trockensubstanz von $W_C=0,0665 \text{ kg C kg}^{-1}$ Gesamttrockensubstanz berechnen ließ. Über die Presssaftmessungen wurde ein Nitratgehalt von $0,0016 \text{ kg NO}_3 \text{ kg}^{-1}$ Frischsubstanz ermittelt. Bei einem mittleren Trockensubstanzanteil von $0,11 \text{ kg kg}^{-1}$ Frischsubstanz resultierte aus der Multiplikation mit 14, dividiert durch 62, der Anteil an N-Substrat je kg Gesamttrockensubstanz von $W_N=0,0032 \text{ kg N kg}^{-1}$. Der Anteil des pflanzeneigenen Substrates am Gesamt-trockengewicht berechnete sich über folgende Gleichung:

$$W_S = \frac{M_C}{12} * W_C + \frac{M_N}{14} * W_N \quad (17)$$

und war gleich $0,172 \text{ kg kg}^{-1}$ Gesamttrockensubstanz. Folglich betrug die mittlere Strukturmasse $W_G=0,828 \text{ kg kg}^{-1}$ Gesamttrockensubstanz. Nach Division von W_C

und W_N durch W_G erhielt man mittlere Schätzwerte für C und N, 0,0791 kg C bzw. 0,0038 kg N kg^{-1} Strukturtrockenmasse.

Durch Einsetzen von C und N konnte in Verbindung mit den ermittelten N-Konzentrationen in den entsprechenden Nährlösungen eine analytische Anpassung von Gleichung (16) an die beobachteten N-Aufnahmeraten durchgeführt werden (Abb. 59). Bei einem schwachen Bestimmtheitsmaß von $B=0,48$ lagen die Werte der Parameter bei:

$$\sigma_N = 6,339, K_C = 0,01 \text{ und } K_N = 0,005,$$

wobei nur der Parameter σ_N an die vorhandenen Daten angepasst wurde, da die Parameter K_C und K_N aufgrund der Streuung der beobachteten Messwerte der Stickstoffaufnahme nicht im Bereich plausibler Werte berechnet werden konnten. Die Werte für K_C und K_N folgten Angaben von JOHNSON und THORNLEY (1985) für Weidegras.

Die Streuung der beobachteten Messwerte der N-Aufnahme deutete auf weitere Einflussfaktoren hin, die bei Verwendung von Gleichung (16) nicht einbezogen wurden (Abb. 59). Die Verwendung von Mittelwerten für C und N könnte dabei zu Ungenauigkeiten geführt haben, da diese von Faktoren wie die mittlere Einstrahlungsinintensität in Bezug auf C und die Aktivität der Wurzeln in Bezug auf N abhängig waren. Eine kontinuierliche Bestimmung der C- und N-Mengen im pflanzeigenen Speicher war jedoch nicht durchführbar. Für die Erstellung des Modells lieferte diese Analyse wichtige Anfangswerte. Innerhalb des Modells veränderten sich die Werte für C und N dynamisch und waren stets von der Aktivität der Photosynthese, Atmung und N-Aufnahme abhängig.

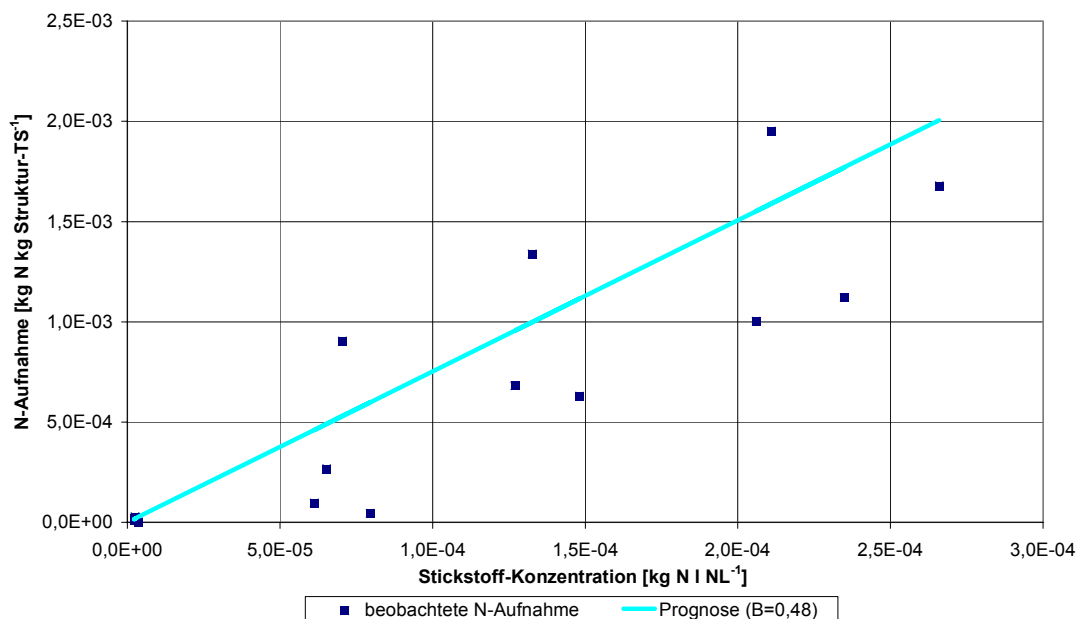


Abb. 59: Stickstoffaufnahme eines Wurzelsystems von *Gerbera jamesonii* 'Moana' in Abhängigkeit von der Stickstoffkonzentration in der Nährlösung (Gleichung 16).

Die Wurzelatmung setzte sich nach JOHNSON (1985) aus den Teilen Erhaltungs- und Wachstumsatmung sowie den Atmungsverlusten bei der Nährstoffaufnahme zusammen. Die C-Verluste durch die Atmung zur Energiegewinnung für die N-

Aufnahme konnten experimentell nicht ermittelt werden und wurden daher mit $\alpha_N = 0,5 \text{ kg C kg}^{-1} \text{ N}$ von JOHNSON (1985) übernommen.

Die gesamte Wurzelatmung R_{WU} war abhängig von der Temperatur im Wurzelraum (Abb. 60). Da sich die N-Aufnahme in den Messungen als unabhängig von der Temperatur erwies, konnte die Erhaltungs- und Wachstumsatmung als temperaturabhängig betrachtet werden. Folgende Gleichung, die die C-Verluste durch Atmung bei der N-Aufnahme und die Erhaltungs- und Wachstumsatmung der Wurzeln enthielt, wurde an die Wurzelatmungsdaten angepasst:

$$R_{WU} = \alpha_N * U_N + r_{w1} + r_{w2} * X_7 \quad (18)$$

wobei

$$\begin{aligned} \alpha_N &= 0,5 \\ X_7 &= \text{Wurzelraumtemperatur [}^\circ\text{C]} \\ r_{w1} + r_{w2} * X_7 &= R_W [\text{kg C kg}^{-1} \text{ Trockengewicht}] \end{aligned}$$

Die ermittelten Werte für r_{w1} und r_{w2} waren:

$$r_{w1} = -0,00376, r_{w2} = 0,000450, B = 0,48$$

Obwohl die Wurzelatmungswerte eine große Streubreite aufwiesen, konnte mit Gleichung (18) eine Anpassung der Parameter erfolgen (Abb. 54). Die Regressionsgleichungen in den Abb. 59 und 60 wiesen einen annähernd linearen Anstieg mit steigender N-Konzentration in der Nährlösung bzw. Wurzelraumtemperatur auf. Im oberen Viertel der Datenbereiche hätte man einen sättigenden Kurvenverlauf aufgrund von zu hohen N-Konzentrationen bzw. Temperaturen erwarten können. Die geringe Datendichte ließ jedoch die Berechnung nicht-linearer Funktionen mit sättigendem Verlauf nicht zu, so dass nur lineare Gleichungen angepasst werden konnten. Die Grenzen der Gültigkeit dieser mathematischen Funktionen innerhalb eines biologisch plausiblen Wertebereichs sollten daher beachtet werden.

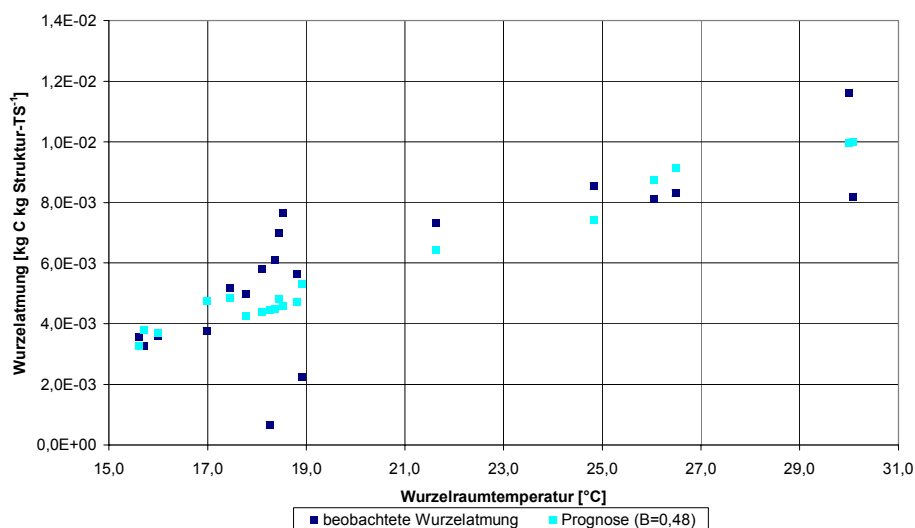


Abb. 60: Atmung eines Wurzelsystems von *Gerbera jamesonii* 'Moana' in Abhängigkeit von der Wurzelraumtemperatur unter Berücksichtigung der Stickstoffkonzentration in der Nährlösung in der Regressionsgleichung (Gleichung 18).

5.13 Modellstruktur

In der Pflanze werden Assimilate und Nährstoffe von den „Quellen“ der Produktion (Photosynthese) und der Aufnahme (Wurzeln) in die Wachstumsbereiche und Speichergewebe als „Senken“ verlagert. Die Assimilatverteilung folgt dem Konzentrationsgradienten von den Orten der Produktion hin zu den Stellen des größten Bedarfs, um entsprechenden Pflanzenorganen energiereiche Kohlenstoffverbindungen für Wachstum, Atmung und, falls ein Überschuss vorhanden ist, Speicherung zur Verfügung zu stellen. Bei den Nährstoffen wird insbesondere der Stickstoff zum Teil schon in der Wurzel assimiliert oder über den Transpirationsstrom in den Spross geleitet und in organische Verbindungen umgesetzt (LARCHER, 1994). Diese „Quellen-Senken“-Beziehungen bildeten die Grundlage bei der Erstellung des Modells.

Die Entwicklung des Modells begann mit den Berechnungen für die Energie und Substrat liefernden Photosynthesevorgänge des Bestandes in den Untermodellen P_{d1} , P_{d2} und P_{d3} entsprechend gewählter Blattalterskategorien für sich entwickelnde, vollentwickelte und alternde, absterbende Blätter sowie der N-Aufnahme U_N durch die Wurzeln. Die daraus resultierenden C- und N-Substrate in W_C und W_N bildeten den pflanzeigenen Substratspeicher (Abb. 61).

Danach folgte die Aufteilung des vorhandenen Substrates auf die Pflanzenteile Spross und Wurzel. Ein Teil des für den Sprosszuwachs zur Verfügung stehenden Substrates ging in die Blumenentwicklung ein. In einer Statusvariable für 'Blumen' befanden sich daher alle sich entwickelnden Blumen, die zu Beginn ihrer Reifephase als Ernteprodukt von der Pflanze getrennt und in die Statusvariable 'Ernte' überführt wurden (Abb. 61).

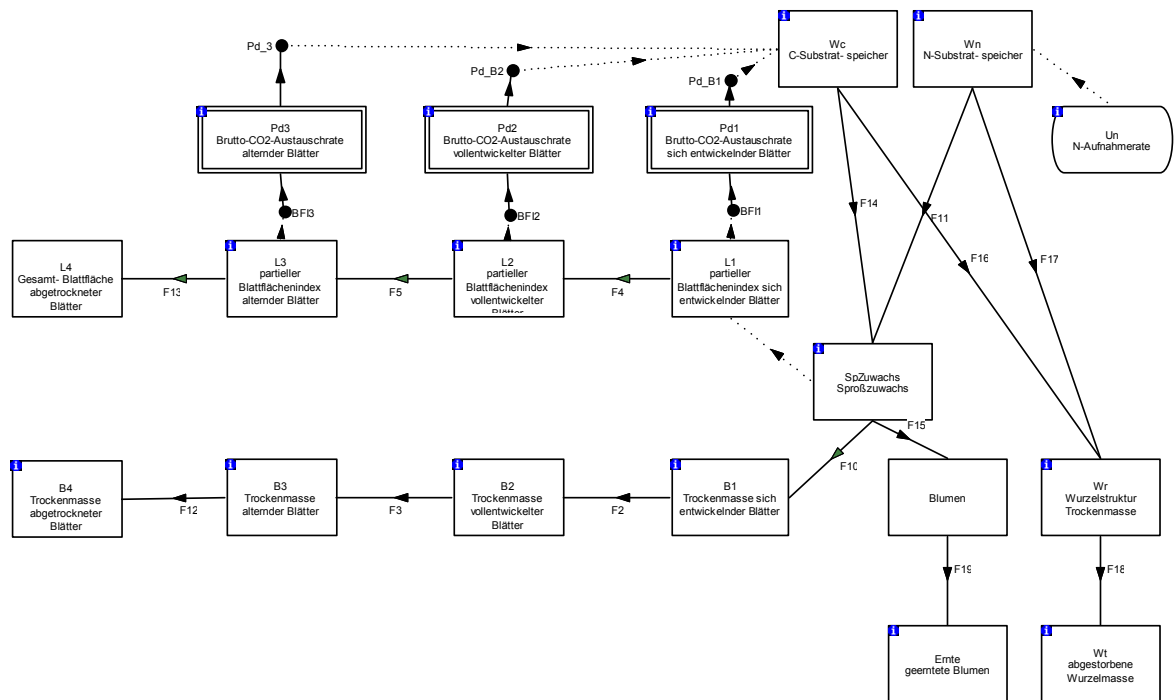
Die Wurzelmasse stellte sich im Modell nur in der Statusvariablen W_r dar, da aus den durchgeführten Versuchsreihen und der Literatur nicht genügend Daten für eine Differenzierung bezüglich des Alters der Wurzelmasse vorlagen. Zusätzlich wurde eine Statusvariable für abgestorbene Wurzelmasse, W_t , einbezogen (Abb. 61).

Anhand der Pflanzenbeobachtungen und Gaswechsellmessungen an Blättern verschiedenen Alters war ersichtlich, dass zwischen unterschiedlich alten Blättern Abweichungen hinsichtlich ihrer photosynthetischen und respiratorischen Leistungen bestanden, so dass eine Einteilung der Gesamtblattmasse in Alterskategorien angebracht erschien (Abschnitt 5.11.3). Im Modell wurden die Blätter in drei Alterskategorien unterteilt:

1. sich entwickelnde Blätter (B1)
2. vollentwickelte aktive Blätter (B2)
3. alternde, absterbende Blätter (B3)

In einer zusätzlichen vierten Kategorie (B4) fand sich bereits abgestorbenes Blattmaterial wieder. Die beschriebenen Kategorien enthielten Blattstrukturtrockenmassen. Für die Photosyntheseberechnungen waren Blattflächenwerte jedoch geeigneter, so dass analog zu den Kategorien der Blattmassen Statusvariablen für die entsprechenden partiellen Blattflächenindices in Abhängigkeit der Altersstruktur berücksichtigt wurden (L1 bis L4) (Abb. 61).

Damit sich ein geschlossener Kreislauf ergab, erfolgte eine Verbindung der Statusvariablen für die Blattflächenindices der sich entwickelnden, vollentwickelten und alternden, absterbenden Blätter mit den Photosyntheseuntermodellen P_{d1} , P_{d2} und P_{d3} und der Wurzelmasse mit der Stickstoffaufnahme U_N .



5.13.1 Klima- und Wachstumsfaktoren

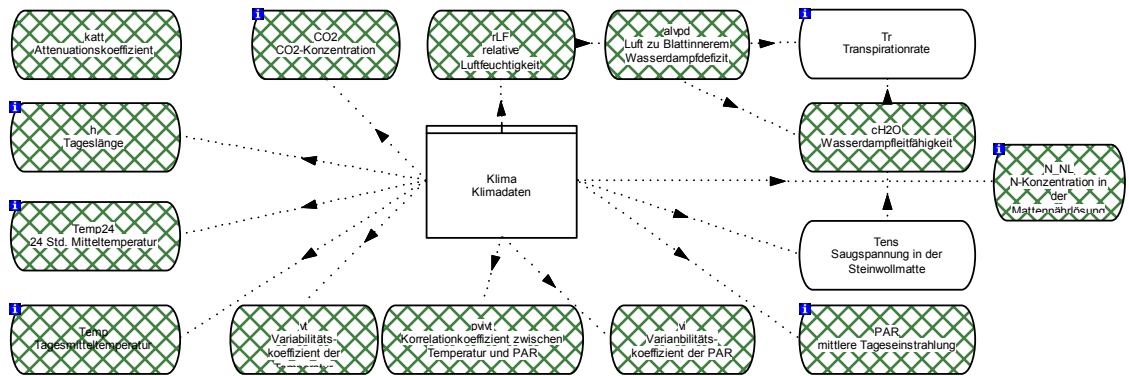


Abb. 62: Diagrammteil des Modells für die allgemein verfügbaren externen Klima- und Wachstumsfaktoren.

5.13.2 Untermodelle zur Photosynthese

Die tägliche Brutto-CO₂-Austauschrate des Gerberabestandes und damit der Zufluss an Kohlenstoffverbindungen in den C-Speicher W_C (Abb. 61) ergab sich aus der Summe der berechneten CO₂-Aufnahme in den Untermodellen P_{d1} , P_{d2} und P_{d3} entsprechend der Blattalterskategorien. Um die Berechnung der täglichen Brutto-CO₂-Austauschrate überschaubar zu halten, wurden in die P_d -Untermodelle weitere Untermodelle eingebunden, die im folgenden als P_n - und P_c -Untermodelle beschrieben werden.

5.13.2.1 P_n - Berechnung der Photosyntheseparameter

Das erste Untermodell, im folgenden P_n genannt, berechnete unter Berücksichtigung der äußeren Klima- und Wachstumsfaktoren auf der Grundlage der Gleichungen (10) bis (13) die Photosyntheseparameter α , P_{max} , θ und R_d (Abb. 63). Zudem konnte mit Hilfe von Gleichung (9) die Netto-CO₂-Austauschrate als Zusatzinformation ermittelt werden, die allerdings innerhalb des Modells nicht benötigt wurde, da in den übergeordneten Modellteilen nur die Brutto-CO₂-Austauschrate Verwendung fand.

Die Bestimmung von α , P_{max} , θ und R_d erfolgte für jede Blattalterskategorie unter Berücksichtigung des mittleren Blattalters in einem einzelnen Untermodell. Die Bezeichnung der Untermodelle P_{n1} , P_{n2} und P_{n3} entsprach den Alterskategorien von sich entwickelnden, vollentwickelten und alternden, absterbenden Blättern.

Die Parameter α , P_{max} und R_d wurden von den P_n -Untermodellen an übergeordnete Untermodelle mit den Bezeichnungen P_{c1} , P_{c2} und P_{c3} , die die Brutto-CO₂-Austauschrate aller Blätter einer Alterskategorie innerhalb des Bestandes berechneten, über die Schnittstellen α_2 , P_{max2} und R_{d2} weitergegeben (Abb. 63). Die Berechnung von θ fand unabhängig vom Blattalter nur in P_{n1} statt, da θ im Gegensatz zu den anderen Parametern im Modell an mehreren Stellen benötigt wurde und die Übersichtlichkeit unter einer Vielzahl an Einflusspfeilen, die von θ ausgingen, gelitten hätte. θ erhielt daher einen globalen Status (grüne Schraffur), so dass der Wert allen Untermodellen zur Verfügung stand.

Die Berechnung der informellen Netto-CO₂-Austauschrate benötigte die mittlere Einstrahlung, die auf die Blattoberfläche traf. Bei P_{n1} wurde davon ausgegangen, dass die Blätter die volle Einstrahlung, die auf den Bestand traf, erhielten, da, wie in

Abschnitt 5.2 beschrieben, die sich entwickelnden Blätter aus der Mitte der Pflanzen in einem steilen Winkel heraustrieben und dabei die flacher abgestellten vollentwickelten Blätter zum Teil beschatteten. Der Anteil der oberhalb der vollentwickelten Blätter liegenden Blattfläche wurde auf zwei Drittel der Blattfläche der sich entwickelnden Blätter geschätzt. Alternde, absterbende Blätter erhielten eine wesentlich geringere Einstrahlung, da die sich entwickelnden und vollentwickelten Blätter deren Blattflächen schattierten.

Die Minderung der Einstrahlungsintensität fand dadurch Berücksichtigung, dass die Einstrahlungsstärke für die Berechnung der Netto- CO_2 -Austauschrate in P_{n2} mittels des Attenuationskoeffizienten k_{att} und zwei Drittel des Blattflächenindex $L1$ der sich entwickelnden Blätter und in P_{n3} unter Einbeziehung der Summe der Blattflächenindex $L1$ und $L2$ für die ersten beiden Blattaltersstufen über Gleichung (2) berechnet wurde.

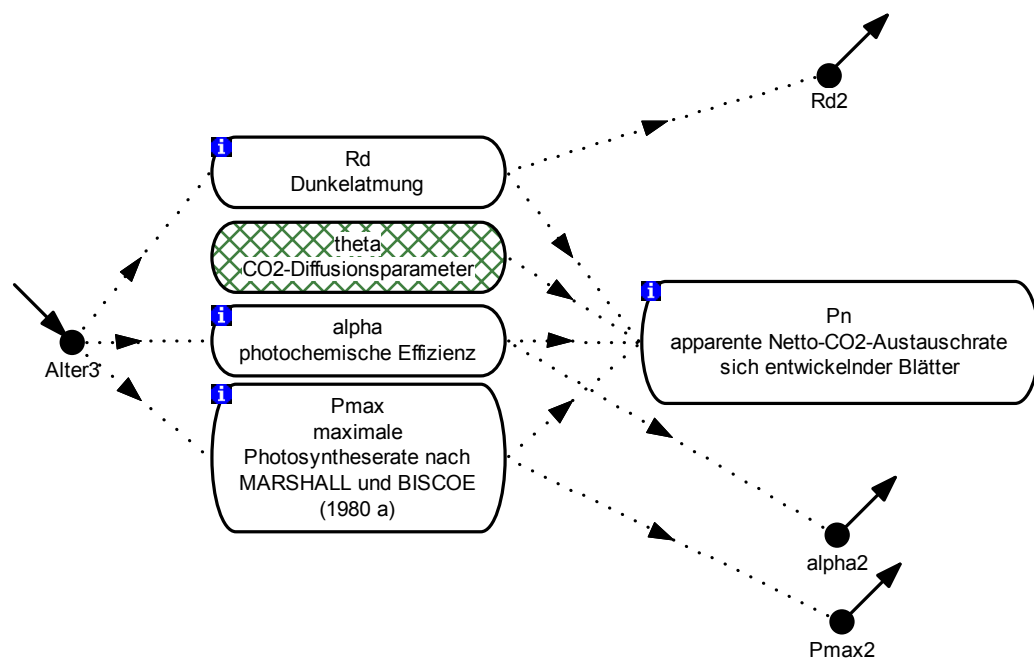


Abb. 63: Untermodell P_{n1} für die Berechnung der Photosyntheseparameter und der Netto- CO_2 -Austauschrate in der Blattalterskategorie für sich entwickelnde Blätter. Das Untermodell griff auf die allgemein verfügbaren Klima- und Wachstumsparameter zu.

5.13.2.2 P_c - Berechnung der Brutto- CO_2 -Austauschrate

Zur Berechnung der Brutto- CO_2 -Austauschrate der Blätter einer Alterskategorie folgte das Modell einem Berechnungsschema für C_3 -Pflanzen von JOHNSON und THORNLEY (1984). Die von P_{n1} , P_{n2} und P_{n3} übergebenen Photosyntheseparameter α , P_{max} , θ und R_d wurden dafür benötigt.

Das von den P_n -Untermodellen zuvor berechnete P_{max} beruhte auf Gleichung (9) zur Berechnung der Netto- CO_2 -Austauschrate nach MARSHALL und BISCOE (1980 a) und war nicht gleichzusetzen mit dem P_m -Parameter des Photosynthesemodells nach JOHNSON und THORNLEY (1984). Folgende Gegenüberstellung der Definitionen von P_{max} und P_m machte dieses deutlich:

$$P_{\max} = \frac{C_a}{r_d + r_x} \quad (\text{MARSHALL und BISCOE, 1980 a}) \quad (19)$$

$$P_m = \frac{R_d * r_d + C_a}{r_d + r_x} \quad (\text{JOHNSON und THORNLEY, 1984}) \quad (20)$$

Anhand der beiden Gleichungen erkannte man, dass P_{\max} in P_m enthalten war. Des weiteren konnte nach Gleichung (7) $r_d/(r_d+r_x)$ durch θ ersetzt werden, so dass sich für P_m folgende Gleichung auf der Basis der Photosyntheseparameter nach MARSHALL und BISCOE (1980 a) ergab:

$$P_m = P_{\max} + R_d * \theta \quad (21)$$

Die Gleichung, die JOHNSON und THORNLEY (1984) für die Berechnung der Brutto- CO_2 -Austauschrate P einsetzen, war mit Gleichung (9) vergleichbar, enthielt aber keinen Parameter für die Atmungsaktivität:

$$P = \frac{1}{2 * \theta} * \left[\alpha * I + P_m - \sqrt{(\alpha * I + P_m)^2 - 4 * \theta * \alpha * I * P_m} \right] \quad (22)$$

mit Einheiten für P in $\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und I in W m^{-2} PAR als die auf das Blatt eintreffende photosynthetisch aktive Strahlung.

In den P_c -Untermodele wurde die Brutto- CO_2 -Austauschrate aller Blätter im Bestand berechnet. In Gleichung (22) musste daher die Einstrahlung, die auf die Blätter in verschiedenen Tiefen des Bestandes eintraf, berücksichtigt werden. Nach SAEKI (1963) war diese gleich:

$$I_l = \frac{k_{\text{att}}}{1-m} * I_0 * \exp(-k_{\text{att}} * \text{BFI}) \quad (23)$$

wobei I_l die auf ein Blatt in Bestandestiefe unter einem entsprechenden Blattflächenindex BFI auftreffende Einstrahlung und m die Transmissionsrate der Blätter (Abschnitt 5.7) für photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) waren .

Nach Integration der aus den Gleichungen (22) und (23) zusammengesetzten Formel über den Blattflächenindex BFI und Auswertung des Integrals beschrieben JOHNSON und THORNLEY (1984) folgendes Gleichungssystem zur Berechnung der Brutto- CO_2 -Austauschrate des Bestandes P_c :

$$P_c = \frac{1}{2 * \theta * k_{\text{att}}} * [x_0 - x_1 - F(x_0) + F(x_1)] \quad (24)$$

$$\text{wobei} \quad x_0 = \frac{\alpha * k_{\text{att}} * I_0}{1-m} \quad x_1 = \frac{\alpha * k_{\text{att}} * I_0}{1-m} * \exp(-k_{\text{att}} * \text{BFI}) \quad (24 \text{ a})$$

und

$$F(x_0) = \text{term} x_0 + P_m * \ln \left| \frac{\text{term} x_0 + x_0 + P_m * (1 - 2 * \theta)}{P_m * [\text{term} x_0 + (1 - 2 * \theta) * x_0 + P_m]} \right| - 2 * \theta * P_m * \ln [2 * \{\text{term} x_0 + x_0 + P_m * (1 - 2 * \theta)\}] \quad (24 \text{ b})$$

5.13.2.3 P_d - Berechnung der täglichen Brutto-CO₂-Austauschrate

Der nächste Schritt zur Berechnung der täglichen Brutto-CO₂-Austauschrate des Bestandes P_d war die Integration von P_c über den Tagesverlauf. Zu den variablen äußeren Einflussgrößen, die sich auf die Brutto-CO₂-Austauschrate auswirkten, gehörten Einstrahlung, Temperatur und Tageslänge sowie bezüglich der beiden erstgenannten deren Variabilität über den Tagesverlauf. In den P_d-Untermodeilen wurden die Berechnungen unter Berücksichtigung der mittleren Tageseinstrahlung I₀ [W m⁻²], deren Variabilitätskoeffizient v_I der mittleren Temperatur während des Tages T [°C], deren Variabilitätskoeffizienten v_T und dem Korrelationskoeffizienten zwischen Einstrahlung und Temperatur p_{vIvT} sowie der Tageslänge h [s] durchgeführt. Es ergab sich nach JOHNSON und THORNLEY (1984) folgendes Gleichungssystem, dass in den P_d-Untermodeilen die Tages-Brutto-CO₂-Austauschrate des Bestandes entsprechend der Blattalterskategorien P_{d1}, P_{d2} und P_{d3} berechnete:

$$P_d = h \cdot P_c - \frac{h}{2} \cdot [F^I(x_1) - F^I(x_0)] \cdot g(T) \quad (25)$$

wobei x₀ und x₁ identisch mit den Parametern in Gleichung (24 a) waren,

$$F^I(x_0) = \frac{P_m}{2 \cdot \theta \cdot k_{att}} \cdot \left| \frac{(1 - 2 \cdot \theta) \cdot x_0 + P_m}{\sqrt{(x_0 + P_m)^2 - 4 \cdot \theta \cdot P_m \cdot x_0}} \right| \quad (25 a)$$

$$F^I(x_1) = \frac{P_m}{2 \cdot \theta \cdot k_{att}} \cdot \left| \frac{(1 - 2 \cdot \theta) \cdot x_1 + P_m}{\sqrt{(x_1 + P_m)^2 - 4 \cdot \theta \cdot P_m \cdot x_1}} \right| \quad (25 b)$$

$$g(T) = \left[v_I - v_T \cdot \left| \frac{T}{T - T_0} \right|^2 + 2 \cdot v_I \cdot v_T \cdot (1 - p_{vIvT}) \cdot \left(\frac{T}{T - T_0} \right) \right] \quad (25 c)$$

wobei T₀ der minimalen Temperatur für photosynthetische Leistung entsprach. In den Modellberechnungen war T₀ = 0 gesetzt.

In den Untermodeilen P_{d2} und P_{d3} wurde wieder die Steuerungsvariable 'Alter' eingesetzt, um die Berechnungen nur durchzuführen, wenn Blätter dieser Blattalterskategorien vorhanden waren. Die P_d-Untermodeile übergaben die Werte für die Tages-Brutto-CO₂-Austauschrate des Bestandes an das Hauptmodell entsprechend der Blattalterskategorien über die Schnittstelle Pd_B_n (Abb.65). Die Eingangsgröße des partiellen Blattflächenindex wurde entsprechend der Blattalterskategorien bis zu den P_c-Untermodeilen weitergereicht, das mittlere Blattalter bis auf die P_n-Ebene.

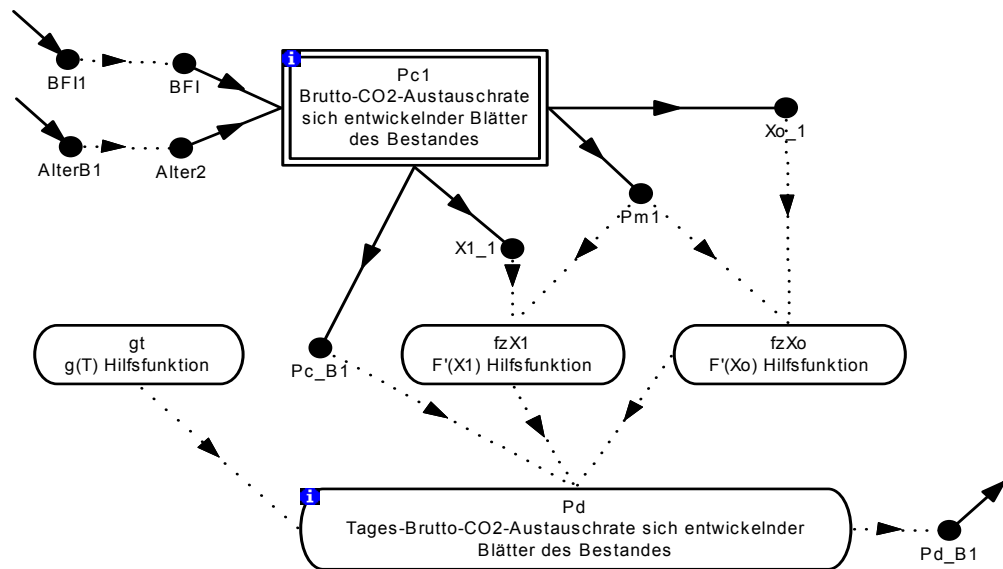


Abb. 65: Untermodell P_{d1} für die Berechnung der täglichen Brutto- CO_2 -Austauschrate in der Blattalterskategorie für sich entwickelnde Blätter.

5.13.3 Hauptmodell

5.13.3.1 Substratspeicher

Pflanzen benötigen zum Wachstum und zum Erhalt der Biomassen Substratquellen, aus denen sie Energie gewinnen oder neue Biomasse bilden können. Die für die Pflanze bedeutensten Substratquellen sind C- und N-Verbindungen wie sie über die Photosynthese bzw. die N-Aufnahme der Wurzeln gewonnen werden. Solange diese im pflanzeigenen Speicher ausreichend vorhanden sind, können sie den Pflanzen frei verfügbar als Substratquellen dienen.

Zur Vereinfachung des Modells wurden das C-Substrat nur als Kohlenhydrat und das N-Substrat in Form von Nitrat berücksichtigt, wobei das C-Substrat kein N und umgekehrt das N-Substrat kein C enthielt. Außer Stickstoff fanden andere Nährstoffe keine Berücksichtigung, so dass diese als ausreichend vorhanden und nicht limitierend angenommen wurden. Das bedeutete, dass der praktische Nutzen des Modells auf Gerberakulturen beschränkt werden muss, in denen alle anderen Nährstoffe jederzeit ausreichend zur Verfügung stehen.

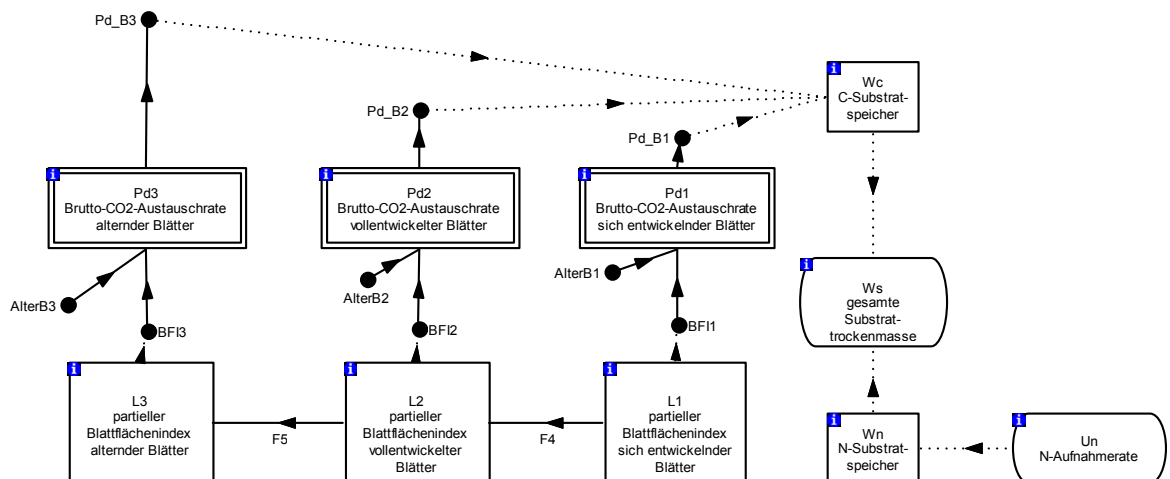


Abb. 66: Teildiagramm des Hauptmodells mit Massen- und Berechnungsflüssen zur Ermittlung des pflanzeigenen Substratspeichers W_S .

In den Modellberechnungen wurden W_C [kg C m⁻²] und W_N [kg N m⁻²] zur Anpassung der Einheiten nicht wie in Abschnitt 5.12.2 beschrieben auf das Gesamtrockengewicht sondern auf die Bestandesfläche bezogen. Beides zusammen ergab nach Umrechnung in das entsprechende spezifische Gewicht den Substratspeicher W_S [kg Substrat m⁻²] (Abb. 66, Gleichung 17).

Das Kohlenstoffsubstrat wurde dem Speicher durch die P_d -Untermodelle zur Berechnung der Brutto-CO₂-Austauschrate entsprechend der drei Blattalterskategorien zur Verfügung gestellt. Neben den innerhalb des Modells allgemein verfügbaren äußeren Klima- und Wachstumsfaktoren verwendeten die P_d -Untermodelle Daten über die mittleren Blattalter und die Blattflächenindizes der Blattalterskategorien.

Die Nährstoffaufnahme der Wurzeln versorgte den Speicher mit Stickstoffsubstrat. Die N-Aufnahmerate U_N [kg N m⁻²] resultierte dabei aus Gleichung (16) für U_N^I [kg N kg⁻¹] multipliziert mit dem Wurzelstrukturrockengewicht W_r [kg m⁻²].

5.13.3.2 Partitionierung des Substrates

Die Aufteilung bzw. Partitionierung der im pflanzeigenen Speicher zur Verfügung stehenden Substrate, Assimilate und Nitrat-Stickstoff, ist in seiner Funktionsweise noch nicht vollends geklärt und wurde von Autoren unterschiedlich interpretiert. Den Einfluss von Temperatur, externer CO₂-Konzentration oder photosynthetisch aktiver Einstrahlung auf die Verwendung der Assimilate zur Biomassenbildung des Sprosses und der Wurzeln passte man zum Teil über mathematische Funktionen an ermittelte Daten an (FUNNEL et al., 1998; FARRAR und WILLIAMS, 1991). THORNLEY und Mitarbeiter (THORNLEY, 1969, 1972 a; COOPER und THORNLEY, 1976; REYNOLDS und THORNLEY, 1982; JOHNSON und THORNLEY, 1987) entwickelten dagegen ein Modell, welches auf der Basis der Größe und Aktivität von Spross und Wurzeln die Aufteilung der Assimilate und N-Komponenten steuerte. Dabei galt nach DAVIDSON (1969) der Grundsatz der Proportionalität für folgende Beziehung:+

$$\text{Sprossmasse} \times \text{spez. Sprossaktivität} \Leftrightarrow \text{Wurzelmasse} \times \text{spez. Wurzelaktivität} \quad (26)$$

Die Aktivitäten von Spross und Wurzel entsprachen der Photosynthese und CO₂-Assimilation bzw. der N-Aufnahme und hingen von den Umweltbedingungen ab. Die absolute Sprossaktivität verhielt sich damit proportional zur Wurzelaktivität. THORNLEY und JOHNSON (1990) gingen davon aus, dass die Pflanze stets bemüht ist, dieses funktionelle Gleichgewicht aufrecht zu erhalten. So würde eine Pflanze, deren C-Assimilation durch niedrigere Einstrahlungssummen verringert wäre, damit reagieren, die assimilatorische Blattfläche zu vergrößern und das Spross- zu Wurzel-Verhältnis auszuweiten. Dagegen würde die Pflanze bei verringertem N-Angebot versuchen, durch eine Vergrößerung des Wurzelsystems diesen Mangel auszugleichen.

Die Partitionierung der Substratquellen in dem zu entwickelnden Modell sollte nicht direkt über die äußeren Klima- und Wachstumsfaktoren beeinflusst werden, da diese bereits auf der Ebene der Photosynthese und der N-Aufnahme eingebunden waren und sich auf die Substratkonzentrationen auswirkten. Daher war es von Vorteil, Modellstrukturen zu verwenden, die sich auf die zur Verfügung stehenden C- und N-Substrate beschränkten und in deren Abhängigkeit die Aufteilung steuern konnten. Das Prinzip der Substratpartitionierung folgte einem von JOHNSON und THORNLEY (1987) aufgestellten Teilmodell, das diese Eigenschaften aufwies.

Durch die Aufteilung der Trockensubstanz der Pflanze, W, in Struktur- und Substrattrockenmasse, W_G und W_S, ergaben sich nach JOHNSON und THORNLEY (1987) für die C- und N-Substrate folgende Konzentrationen und Anteile der Struktur-trockenmassen:

$$W = W_G + W_S \quad (27)$$

$$W_G = W_{sh} + W_r \quad (28)$$

$$C = \frac{W_C}{W_G} \quad N = \frac{W_N}{W_G} \quad (29)$$

$$f_{sh} = \frac{W_{sh}}{W_G} \quad f_r = \frac{W_r}{W_G} \quad (30)$$

Dabei stellten C und N die Konzentrationen der C- und N-Substrate [kg C kg^{-1} , kg N kg^{-1}] bezogen auf das gesamte Struktur Trockengewicht und f_{sh} und f_r [kg kg^{-1}] die Anteile der Spross- (W_{sh}) und Wurzelstruktur Trockengewichte (W_r) am gesamten Struktur Trockengewicht W_G dar.

Im Hauptmodell wurden Massenflüsse von W_C und W_N zu den Statusvariablen der für den Sprosszuwachs zur Verfügung stehenden Biomasse 'SpZuwachs' und zur Wurzelstrukturmasse W_r angezeigt (Abb. 67). Diese Massenflüsse F11, F14, F16 und F17 steuerte das Partitionierungsuntermodell PART. Für seine Berechnungen erhielt PART vom Hauptmodell Daten über W_{sh} , W_r , f_{sh} , f_r , C und N.

Der Zuwachs an Strukturmasse der gesamten Pflanze [$\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$] errechnete sich nach JOHNSON (1984) aus

$$\frac{dW_G}{dt} = k_{gro} * C * N * W_G \quad (31)$$

Für das Spross- und Wurzelwachstum wurden entsprechende Differentialgleichungen verwendet:

$$\frac{dW_{sh}}{dt} = k_{gro} * C * N * \lambda_{sh} * W_{sh} \quad \frac{dW_r}{dt} = k_{gro} * C * N * \lambda_r * W_r \quad (32)$$

wobei $\lambda_{sh} + \lambda_r = 1$ (33)

λ_{sh} und λ_r waren dimensionslose Koeffizienten zur Aufteilung des Zuwachses auf Spross und Wurzel sowie k_{gro} ein Wachstumsratenkoeffizient war, über den die absolute Wachstumsrate kontrolliert wurde. Die Zuwachsraten, die aus Gleichung (32) resultierten, erhielten innerhalb des PART-Untermodells die Bezeichnungen P_{Psh} und P_{Pr} (Abb. 68).

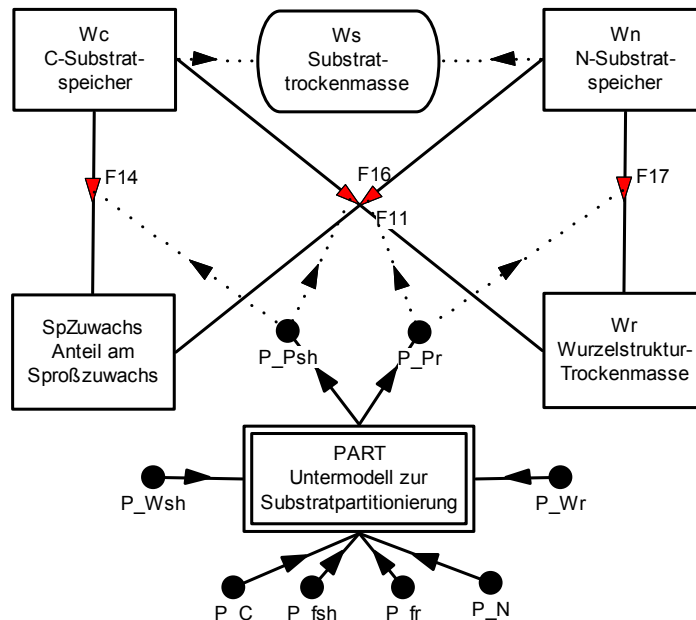


Abb. 67: Teilmodell der Substratpartitionierung innerhalb des Hauptmodells einschließlich des PART-Untermodells, in welchem die Berechnungen zur Steuerung der Massenflüsse durchgeführt wurden.

Die λ -Koeffizienten konnten mit Hilfe der Partitionierungsfunktion P berechnet werden, in welche das Verhältnis von Spross- zu Wurzelmasse wie auch die Anteile an C und N innerhalb der Struktur- und Substrattrockenmassen einfließen (Gleichung 35). Anhand Gleichung (33) war erkennbar, dass eine höhere Zuteilung des Zuwachses auf einen Pflanzenteil automatisch eine Verringerung für den anderen bedeutete.

Folgende Gleichungen nach JOHNSON und THORNLEY (1987) wurden für die Berechnungen der λ -Koeffizienten und der Partitionierungsfunktion P verwendet:

$$\lambda_{sh} = \frac{P}{1+P} \quad \lambda_r = \frac{1}{1+P} \quad (34)$$

$$P = \frac{f_r \cdot \frac{N}{(N + f_N)}}{f_{sh} \cdot \frac{C}{(C + f_C)}} \quad (35)$$

Das PART-Untermodell übergab an das übergeordnete Hauptmodell die Wachstumsraten des Sprosses und der Wurzeln, P_{sh} und P_r , in kg Strukturtrockenmasse m^{-2} . Innerhalb des Hauptmodells führte die Berechnung der Werte der Statusvariablen W_C , W_N , 'SpZuwachs' und W_r zu folgenden Massenflüssen und Differentialgleichungen:

$$F14 = P_{sh} \cdot f_C \quad [kg \ C \ m^{-2}], \quad (36)$$

$$F11 = P_{sh} \cdot f_N \quad [kg \ N \ m^{-2}], \quad (37)$$

$$F16 = P_r \cdot f_C \quad [kg \ C \ m^{-2}], \quad (38)$$

$$F17 = P_r \cdot f_N \quad [kg \ N \ m^{-2}], \quad (39)$$

wobei f_C und f_N in $kg \ C \ kg^{-1}$ bzw. $kg \ N \ kg^{-1}$ die C- und N-Konzentrationen in der Strukturtrockenmasse waren, unter der Annahme einer gleichen Zusammensetzung der Strukturtrockenmasse innerhalb der gesamten Pflanze.

$$\frac{dW_C}{dt} = \frac{12}{44} \cdot (P_{d1} + P_{d2} + P_{d3}) - F14 - F16 \quad [kg \ C \ m^{-2}] \quad (40)$$

$$\frac{dW_N}{dt} = U_N - F11 - F17 \quad [kg \ N \ m^{-2}] \quad (41)$$

$$\frac{dSpZuwachs}{dt} = \frac{\left| \frac{F14}{f_C} + \frac{F11}{f_N} \right|}{2} \quad [kg \ Strukturtrockenmasse \ m^{-2}] \quad (42)$$

$$\frac{dW_r}{dt} = \frac{\left| \frac{F16}{f_C} + \frac{F17}{f_N} \right|}{2} \quad [kg \ Strukturtrockenmasse \ m^{-2}] \quad (43)$$

Die beschriebenen Differentialgleichungen (40) bis (43) sollten noch ergänzt werden, da die Abgänge aus den einzelnen Statusvariablen, wie zum Beispiel C-Verluste durch Atmung in W_C oder der Blatt- und Blumenzuwachs in 'SpZuwachs', bislang nicht berücksichtigt wurden.

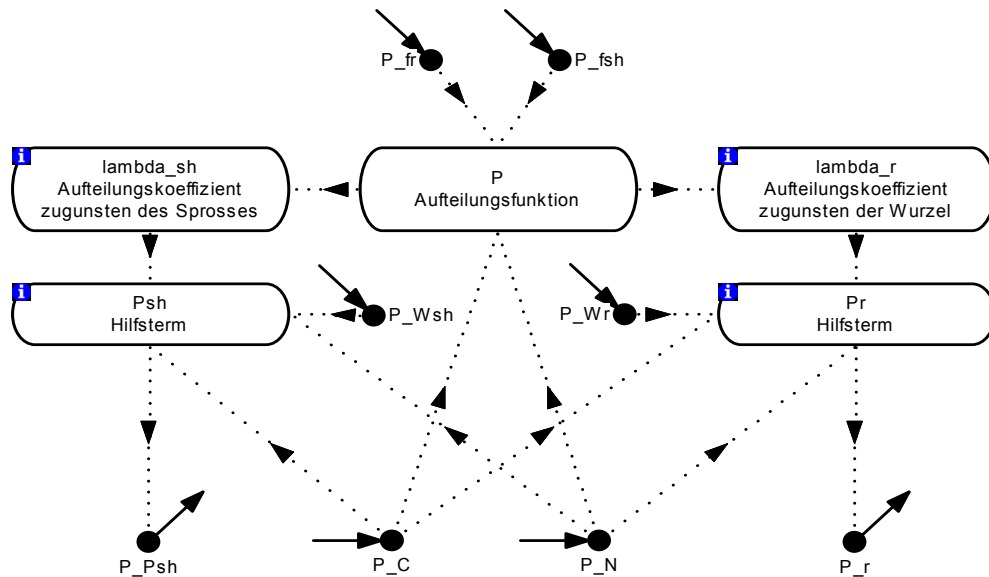


Abb. 68: Untermodell PART zur Berechnung der Zuwachsraten P_{Psh} und P_{Pr} zur Steuerung der Massenflüsse F11, F14, F16 und F17 bei der Partitionierung der pflanzeigenen C- und N-Substrate.

5.13.3.3 Blumenentwicklung

Nach der Aufteilung des Zuwachses an Struktur Trockenmasse auf Wurzel und Spross folgte die Modellfunktion, in welcher das vegetative und generative Wachstum der Gerbera simuliert wurde. Wie in Abschnitt 5.4 gezeigt, bildeten sich an den Haupt- und Seitentrieben bevor sich Blumen entwickelten zuerst eine Anzahl an Blättern. Die Anzahl der gebildeten Blätter konnte mit Hilfe der in Abschnitt 5.5 beschriebenen Blattflächenberechnung in einen täglichen Zuwachs an Blattfläche umgerechnet werden, so dass für die Modellrechnungen in Abhängigkeit des Wachstumszeitraums Grenzwerte zur Verfügung standen, bei deren Überschreitung vermehrt Blumenzuwachs stattfand (Anhang C). Im Mittel entwickelten sich zwei Blumen an einem Triebsegment, bevor wieder verstärkt Blattwachstum an einem abzweigenden Seitentrieb erfolgte. Dabei musste beachtet werden, dass während des Blumenwachstums weiterhin Blattmasse gebildet wurde.

Abb. 69 gibt das Teilmodell wieder. Von der Statusvariablen 'SpZuwachs' gingen die Massenflüsse F10 und F15 aus, die die Verteilung des Zuwachses auf sich entwickelnde Blattmasse B1 bzw. 'Blumen' wiedergaben.

$$F10 = (1 - \text{Schalter}) * \text{SpZuwachs} \quad (44)$$

$$F15 = \text{Schalter} * \text{SpZuwachs} \quad (45)$$

Die Anteile der Blatt- und Blumenmassenzuwächse am gesamten Sprosszuwachs steuerte die Variable 'Schalter'. Diese Variable, als Umschalter zwischen vorwiegend

vegetativem und generativem Wachstum gedacht, berechnete sich aus einer Switch-Funktion mit sigmoidalem Kurvenverlauf (THORNLEY und JOHNSON, 1990).

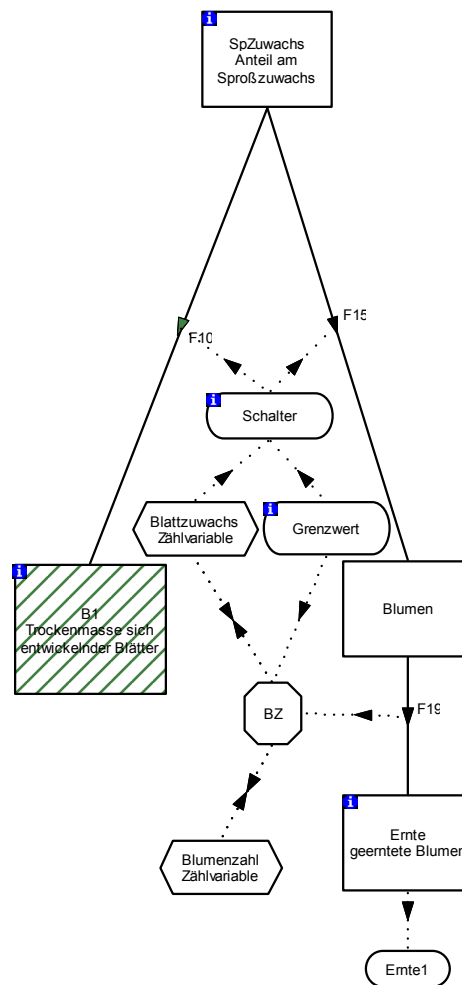


Abb. 69: Teilmodell der Sprosszuwachaufteilung innerhalb des Hauptmodells auf Blätter und Blumen.

$$\text{Schalter} = z^* \frac{\text{Blattzuwachs}^s}{(\text{Blattzuwachs}^s + \text{Grenzwert}^s)} \quad (46)$$

wobei $z=0,6955$ und $s=8$ waren.

Der Bruch innerhalb der Funktion nahm Werte zwischen 0 und 1 an, so dass der Parameter z den maximalen Anteil des Blumenzuwachses am gesamten Sprossstrukturzuwachs definierte. Der Parameter s bestimmte die Steilheit des sigmoidalen Verlaufs bei Annäherung des Blattzuwachses an den Grenzwert. Die Parameter z und s wurden mittels der Optimierungsfunktion der Software ModelMaker an die Modelldaten angepasst.

Die Variable 'Blattzuwachs' war eine Zähl- bzw. Summenvariable, in welcher der Blattzuwachs in $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ solange aufaddiert wurde, bis der Grenzwert erreicht war und vermehrt Blumenzuwachs erfolgte. Die Grenzwerte bildeten sich aus den in Abb. 15 entsprechend den verschiedenen Zeiträumen angegebenen Mittelwerten für die Anzahl Blätter je Triebsegment und deren mittleren Blattflächen multipliziert mit der

Standweite von 6,7 Pfl. m⁻². War der Blattzuwachs gleich dem Grenzwert, betrug die Schalter-Variable $z \cdot 0,5$. Darüber hinaus näherte sich der Bruch dem Wert 1, so dass sich bei Überschreiten des Grenzwertes nach Gleichung (46) der Anteil an Blumenstrukturmassenbildung gegenüber der Blattmassenbildung deutlich erhöhte und der Massenfluss F15 zur Statusvariablen 'Blumen' zunahm.

In der Statusvariablen 'Blumen' wurde die aktuell vorhandene Blumenstruktur-trockenmasse angezeigt. Der Massenfluss F19 von der Statusvariablen 'Blumen' zur Statusvariablen 'Ernte' fand immer dann statt, wenn in der Statusvariable für 'Blumen' die Blumenstruktur-trockenmasse ein definiertes Trockengewicht erreichte. Die Bestimmung des Blumentrockengewichtes ging auf eine Exponentialfunktion zurück, welche an ermittelte Blumentrockengewichte in Abhängigkeit von der Wochenlichtsumme und mittels der Optimierungsfunktion von ModelMaker an die Modelldaten angepasst wurde (Gleichung 47). Dabei erfolgte eine Multiplikation des Blumentrockengewichtes mit dem Anteil des Struktur-trockengewichtes am Gesamt-trockengewicht f_{WG} . Der Massenfluss F19 wurde in der Statusvariable 'Ernte' in Stück Blumen umgerechnet und kumuliert und war damit der entscheidende Wert des Modells für den Erfolg der Gerberakultur. Die angefügte Variable 'Ernte1' stellte nur einen Hilfwert für die statistische Überprüfung der Qualität des Modells dar und entsprach einem Hundertstel der Statusvariable 'Ernte'.

$$F19 = p_{bz1} \cdot \text{Wochenlichtsumme}^{pbz2} \cdot f_{wg} \cdot n \quad (47)$$

mit $p_{bz1} = 0,000710564$ und $p_{bz2} = 0,416366$

wobei p_{bz1} und p_{bz2} Regressionskoeffizienten waren und n ein Multiplikator, der aus einer Prüfung des Inhaltes der Statusvariablen 'Blumen' resultierte und angab, wieviele Blumen in die 'Ernte' Statusvariable überführt werden konnten.

In diesen Teil des Modells fügte sich das Ereignismodul BZ ein, in welchem die Berechnungen der Summenvariablen 'Blattzuwachs' und 'Blumenzahl' durchgeführt wurden (Anhang C). Der aktuelle Wert von 'Blattzuwachs' und 'Blumenzahl' errechnete sich darin aus folgenden Gleichungen:

$$\text{Blattzuwachs} = \text{Blattzuwachs} + \frac{F10}{f_{wg} \cdot f_{TG}} \quad (48)$$

$$\text{Blumenzahl} = \text{Blumenzahl} + \frac{F19}{p_{bz1} \cdot \text{Wochenlichtsumme}^{pbz2} \cdot f_{wg}} \quad (49)$$

Dabei war f_{WG} [kg kg⁻¹] der spezifische Anteil an Struktur-trockenmasse am Gesamt-trockengewicht der Biomasse und f_{TG} [kg m⁻²] das spezifische Blattflächentrockengewicht mit den Werten $f_{WG} = 0,828 \text{ kg kg}^{-1}$ und $f_{TG} = 0,056 \text{ kg m}^{-2}$.

Mit der Zunahme an Blumen in der Statusvariable 'Ernte' erhöhte sich die Summenvariable 'Blumenzahl'. Erreichte diese den Wert 13,4 Blumen m⁻², der sich aus der mittleren Blumenzahl von zwei Blumen je Triebsegment und Pflanze und der Bestandesdichte von 6,7 Pfl. m⁻² ergab, wurden die Summenvariablen wieder auf null gesetzt, so dass der gesamte Strukturmassenzuwachs für den Blattmassenaufbau zur Verfügung stand und sich erst mit Zunahme der Summenvariable 'Blattzuwachs' wieder zugunsten der Blumenentwicklung reduzierte.

Die Beobachtungen der Blatt- und Blumenzahlen bezogen sich auf ein Triebsegment. An einer Pflanze und auf einem m² befanden sich Triebsegmente, die unter-

schiedliche Wachstumsstadien aufwiesen. Die Modellberechnungen gingen davon aus, dass sich alle Triebsegmente im gleichen Stadium befanden und das Sprosswachstum auf alle Triebsegmente gleichmäßig verteilt wurde.

5.13.3.4 Wachstum der Blätter

Der auf die Blätter verteilte Zuwachs an Struktur-trockenmasse floss über den Massenfluss F10 in die Statusvariable B1 der sich entwickelnden Blätter (Abb. 69). Im weiteren zeitlichen Verlauf erlangten Blätter ihre volle Blattausdehnung und wurden in die Statusvariable B2 für vollentwickelte Blätter überführt (Abb. 70). Diesen Massenfluss F2 steuerte das Modell über verschiedene Gleichungen in Abhängigkeit vom zeitlichen Fortschritt und vom Zeitraum, den ein Blatt benötigte, um seine ganze Blattspreite zu entwickeln (Anhang C).

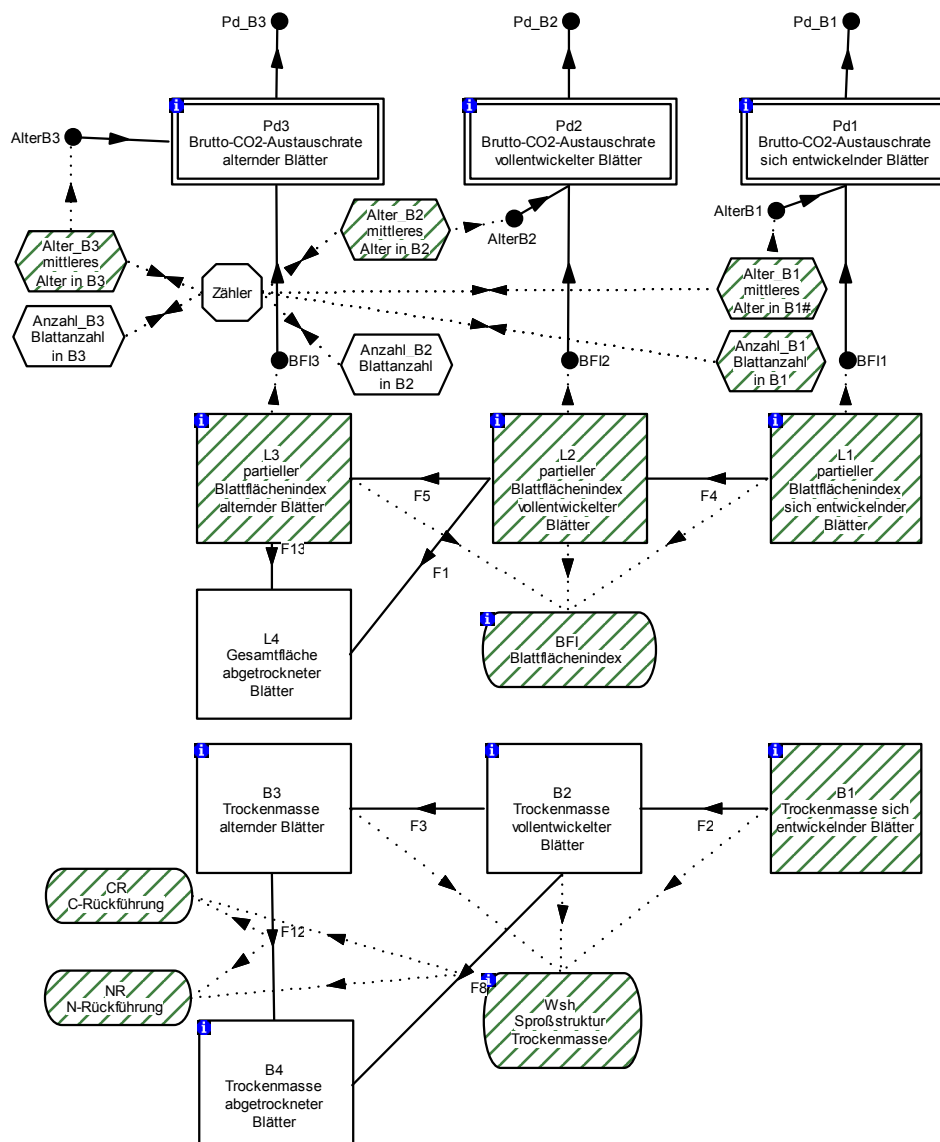


Abb. 70: Teilmodell der Modellierung des Blattwachstums, der Blattaltersstruktur und entsprechender Blattflächenindices innerhalb des Hauptmodells.

Der Statusvariablen B1 wurde ein Anfangswert zugeordnet, der sich von dem zu Beginn der Wachstumsbeobachtungen ermittelten Blattflächenindex ableitete. Der berechnete Blattflächenindex lag bei 0,48 m² Blattfläche m⁻² Boden und stellte den

Anfangswert für die Statusvariable L1, die dem Blattflächenindex sich entwickelnder Blätter entsprach, dar. Aus der Multiplikation von L1 mit dem spezifischen Blattflächentrockengewicht $f_{TG} = 0,056 \text{ kg m}^{-2}$ und dem spezifischen Anteil an Struktur trockenmasse am Gesamtrockengewicht der gesamten Biomasse $f_{WG} = 0,828 \text{ kg kg}^{-1}$ ergab sich der erste Wert für B1 $[\text{kg m}^{-2}]$:

$$B1(t = 0) = L1 * f_{TG} * f_{WG} = 0,02226 \quad (50)$$

Für die Simulation der Blattalterung der in B1 enthaltenen Blätter erfolgte eine Schätzung der Blattaltersstruktur, um zu bestimmen, wieviele Blätter welchen Alters im Anfangswert enthalten waren. Die mittlere Anzahl an Blättern pro Quadratmeter betrug bei den Wachstumsbeobachtungen $48,5 \text{ Blätter m}^{-2}$ und ergab den Anfangswert für die Zählvariable Anzahl_B1.

Es wurde davon ausgegangen, dass die ältesten Blätter mit Beginn der Modellzeitrechnung gerade vollentwickelt waren und bereits am ersten Tag des Modellablaufs aus der Statusvariablen B1 über den Massenfluss F2 in die Statusvariable B2 überführt wurden. Für die Blattaltersstruktur in B1 bedeutete dieses eine linear ansteigende Anzahl an Blättern mit abnehmendem Blattalter, so dass nur wenig vollentwickelte und zunehmend jüngere Blätter an den Pflanzen vorhanden waren. Das Alter der zu diesem Zeitpunkt gerade vollentwickelten Blätter bestimmte eine Regressionsgleichung. Diese beruhte auf Ergebnissen der Wachstumsbeobachtungen, wobei die Zeit zwischen der ersten Notierung sich entwickelnder Blätter und dem Zeitpunkt der Vollentwicklung in Abhängigkeit der mittleren Tageslichtsumme der zurückliegenden sechs Wochen Kulturzeit festgehalten wurde (Abschnitt 5.5).

$$A_{\max} = \text{round} \left[p_{A \max 1} * \left| \frac{\text{Glisu}}{42} \right|^2 + p_{A \max 2} * \frac{\text{Glisu}}{42} + p_{A \max 3} \right] \quad (51)$$

$$p_{A \max 1} = -2,9914, p_{A \max 2} = 2,1536, p_{A \max 3} = 51,1122, (B=0,52)$$

wobei 'round' darauf hinwies, dass nur ganze Zahlen als Entwicklungszeit der Blätter, in Tagen A_{\max} , verwendet wurden, Glisu $[\text{MWs m}^{-2}]$ die Lichtsumme der zurückliegenden sechs Wochen Kulturzeit war und $p_{A \max 1}$, $p_{A \max 2}$ und $p_{A \max 3}$ Regressionskoeffizienten darstellten (Abb. 19). Glisu aktualisierte sich während des Modellablaufs ständig im Ereignismodul GL auf der Basis der zur Verfügung stehenden PAR-Tagesmittelwerte (Anhang C).

$$\text{Glisu} = \text{Glisu} * \frac{41}{42} + \text{PAR} * \frac{h}{1000000} \quad (52)$$

Aus Gleichung (51) ergab sich bei Verwendung eines Anfangswertes für Glisu von 80 MWs m^{-2} ein Wert von 44 Tagen Entwicklungszeit für die sich im Wachstum befindlichen Blätter. Die Schätzung der Blattaltersverteilung führte auf der Basis der Anzahl und der Altersschätzung der Blätter am Beginn der Wachstumsbeobachtungen zu folgender linearer Gleichung:

$$\gamma^l = a_{\gamma l} + b_{\gamma l} * t \quad (53)$$

wobei $a_{\gamma l} = 0,3586$ und $b_{\gamma l} = 0,0333$ Regressionskoeffizienten waren und t der Zeitvariablen im Modell entsprach.

Gleichung (53) berechnete die Anzahl an Blättern m^{-2} , γ^l , die in den ersten 44 Tagen des Modellablaufs in die Statusvariable B2 überwechselten. Nach Ablauf der ersten 44 Tage in der Modellrechnung erfolgte die Berechnung der Anzahl an Blättern, die von B1 nach B2 wechselten, über die Gleichungen (3 a) und (3 b) zur Berechnung der Rate neu gebildeter Blätter $\gamma[t]$ in Abhängigkeit der aktuellen Blattentwicklungsdauer A_{\max} (Anhang C, Ereignismodul 'Rate').

Da sich A_{\max} aufgrund der wechselnden Einstrahlungsverhältnisse ständig änderte, wurde es bei der Berechnung von F2 mit dem in einer Variablen A_{\maxalt} gespeicherten Wert vom Vortag verglichen. Die Bestimmung des Massenflusses in F2 setzte die Umrechnung der Anzahl an Blättern in Blattstrukturrockenmasse mit Hilfe der mittleren Blattfläche B_{\max} , f_{TG} und f_{WG} voraus. Die Berechnung von F2 führte das Modell in Abhängigkeit des zeitlichen Ablaufs und der Veränderung von A_{\max} mit unterschiedlichen Gleichungen (Anhang C) aus. Die dabei benötigte mittlere Blattfläche $B_{\max} [m^2]$ (Anhang C, Ereignismodul 'Rate') errechnete sich aus der Gleichung:

$$B_{\max} = \frac{L1*2}{\text{Anzahl_B1}} \quad (54)$$

wobei Anzahl_B1 der Anzahl an Blättern in der Statusvariablen B1 entsprach, die im Ereignismodul 'Zähler' fortlaufend nicht nur für B1, sondern auch für die Statusvariablen B2 und B3 berechnet wurden (Anhang C). Unter Annahme einer annähernd linearen Verteilung der Blattflächen in Abhängigkeit des Blattalters ergab sich die Multiplikation mit zwei, da in B1 neben nahezu vollentwickelten Blättern auch neuer-schienenene Blätter mit kleinsten Blattflächen enthalten waren und der Mittelwert der Blattfläche somit nur annähernd die Hälfte der maximalen Blattfläche wiedergegeben hätte.

Das Ereignismodul 'Zähler' berechnete neben der Blattanzahl in den jeweiligen Alterskategorien auch das mittlere Blattalter, was für die Bestimmung der Photosynthese- und Atmungsleistungen von Bedeutung war (Anhang C).

Mit zunehmender Alterung der Blätter wurden die ältesten aus der Statusvariablen B2 in die Statusvariable B3 für alternde und absterbende Blätter mittels des Massenflusses F3 überführt. Die Trennung der ersten beiden Blattalterskategorien erfolgte im Modell über die Berechnung von A_{\max} . Der Übergang von der zweiten in die dritte Blattalterskategorie war jedoch fließend und konnte durch äußere Merkmale nicht eindeutig festgehalten werden. Aufgrund der geringeren Blattwinkel und damit zunehmenden Abdeckung durch darüberliegende Blätter und abnehmender Dunkelatmungsintensität ergab sich eine Festlegung der Altersgrenze zwischen beiden Blattalterskategorien im Modell bei einem Blattalter von 100 Tagen (Abschnitt 5.2).

Die Gleichungen, die analog zu F2 den Massenfluss F3 steuerten, sind im Anhang C aufgeführt. Die Differentialgleichungen zur Berechnung der Statusvariablen B1, B2 und B3 waren folgende:

$$\frac{dB1}{dt} = F10 - F2 \quad (55)$$

$$\frac{dB2}{dt} = F2 - F3 - F8 \quad (56)$$

$$\frac{dB3}{dt} = F3 - F12 \quad (57)$$

$$\frac{dB4}{dt} = F12 + F8 - CR - NR \quad (58)$$

Die Massenflüsse F8 und F12 stellten den Verlust von Blattmasse aufgrund von Alterung und Abtrocknung dar. Das abgestorbene Pflanzenmaterial wurde aus der Statusvariablen B3 in die Statusvariable B4 für abgetrocknete Blätter überführt. Es existierte jedoch aufgrund der Wachstumsbeobachtungen auch die Möglichkeit, dass Blätter, die sich noch in B2 befanden, abstarben und direkt nach B4 wechselten. Um den technischen Ablauf des Modells nicht zu gefährden, durfte ein Massenfluss abgestorbener Blätter aus B3 nur dann stattfinden, wenn eine subjektiv festgelegte Mindestblattmasse von $m_b = 0,07 \text{ kg m}^{-2}$ vorhanden war. Die Steuerung der Massenflüsse F8 und F12 nahm das Modell über die in Abschnitt 5.10 beschriebene Absterberate in Abhängigkeit der Einstrahlung und des Blattflächenindex des Bestandes vor. Die Gleichungssysteme für die Massenflüsse sind im Anhang C angegeben. Die in den Gleichungen verwendete Variable BM_w (Anhang C, Ereignismodul 'Rate') gab die mittlere Blattfläche der vollentwickelten Blätter wieder:

$$BM_w = \frac{BM_w * 41 + B_{\max}[t]}{42} \quad (59)$$

Die Variablen CR und NR stellten Rückflüsse von C bzw. N aus abbaubaren Bestandteilen der absterbenden Blattmasse in den Substratspeicher dar. Nach JOHNSON und THORNLEY (1985) war insbesondere der Rückfluss von N abhängig von der N-Versorgung der Pflanzen, so dass der N-Anteil in abgestorbenem Pflanzenmaterial unter N-Mangel geringer war. Der Anteil an Aminosäuren und Proteinen ergab den größten Anteil an abbaubarem Material. JOHNSON und THORNLEY (1985) berechneten die Rückflüsse über den Anteil abbaubaren Materials im absterbenden Gewebe. Da in dieser Untersuchung keine Daten über Proteingehalte ermittelt wurden, stützte sich die Berechnung der Rückflüsse auf C- und N-Gehalte, die in Analysen der LUFA Münster für lebende und abgestorbene Blätter ermittelt wurden. Die C- und N-Gehalte waren in der abgestorbenen Trockenmasse im Mittel um 6,8 % bzw. 55,5 % geringer als in der Trockenmasse aktiver Blätter.

$$CR = (F12 + F8) * f_c * 0,068 \quad (60)$$

$$NR = (F12 + F8) * f_n * 0,555 \quad (61)$$

Analog zu den Statusvariablen B1 bis B4 wurden die Differentialgleichungen der Statusvariablen L1 bis L4 und die Massenflüsse F4, F5, F1 und F13 berechnet. Um die Blattflächenindices zu kalkulieren, entfielen die Umrechnungen in Trockengewichte. Die verwendeten Gleichungen in den Massenflüssen sind Anhang C zu entnehmen, die Differentialgleichungen der Statusvariablen waren folgende:

$$\frac{dL1}{dt} = -F4 + (1 - \text{Schalter}) * \frac{SpZuwachs}{(f_{tg} * f_{wg})} \quad (63)$$

$$\frac{dL_2}{dt} = F_4 - F_5 - F_1 \quad (64)$$

$$\frac{dL_3}{dt} = F_5 - F_{13} \quad (65)$$

$$\frac{dL_4}{dt} = F_{13} + F_1 \quad (66)$$

5.14 Modellbeschreibung und -anpassung

Zur Fertigstellung des Modells wurden die im Abschnitt 5.13 beschriebenen Teilprozeduren zusammengefasst und miteinander verbunden. Das Modell schloss auf der Hauptebene die Verweise auf die Submodelle P_{d1} , P_{d2} und P_{d3} für die Berechnungen der CO_2 -Aufnahme der Blätter entsprechend der drei Blattaltersklassen sowie auf die Partitionierungsfunktion PART zur Steuerung des Zuwachses an Spross- und Wurzelstrukturmasse mit ein (Abb. 71).

In den gezeigten Teildiagrammen fand die Atmung bislang keine Berücksichtigung. Die Massenflüsse F6 und F9 gaben die Anteile der Erhaltungs- und Wachstumsatmung der Blätter wieder (Gleichungen 14 und 15) und wurden in den Statusvariablen R_{gsp} und R_{msp} kumuliert (Abb. 71). Die Erhaltungs- und Wachstumsatmung der Wurzeln sowie die Atmung zur Energiegewinnung für die Nährstoffaufnahme wurde mittels Gleichung (18) im Massenfluss F7 ermittelt und in der Statusvariable R_{WU} aufsummiert.

Im Anschluss daran erfolgte der erste Modelldurchlauf mit Hilfe der Software ModelMaker, die die eingebauten Variablen und Differentialgleichungen fortlaufend berechnete. Als Klimadaten dienten die Tagesmittelwerte aus den Klimaaufzeichnungen des Klimaregelcomputers während des Zeitraums der Wachstumsbeobachtungen sowie die für jede Bewässerungsvariante in den Steinwollmatten festgehaltenen Saugspannungen und Stickstoffkonzentrationen der Nährlösung.

Ein Modelldurchlauf entsprach 365 Tagen. Die berechneten Daten wurden in Form von Tabellen oder Diagrammen aufgezeichnet. Die unabhängige Variable des Modells war die Zeit t mit der Schrittweite eines Tages. Die Berechnungen der Differentialgleichungen erfolgten nach der von ModelMaker vorgeschlagenen Runge-Kutta-Methode vierter Ordnung.

Bei der grafischen Darstellung der berechneten Werte für die Statusvariablen L1, L2, L3, BFI und 'Ernte' in den während des Modelldurchlaufs erstellten Diagrammen wurden die aus dem Beobachtungszeitraum ermittelten Wachstumsdaten als Mittelwerte unter Angabe des Standardfehlers angegeben. Anhand der Diagramme konnte direkt nach dem Modelldurchlauf eine erste Bewertung der Qualität des Modells stattfinden (Abb. 72). Je besser die berechneten Modellwerte mit den beobachteten Werten übereinstimmten, umso genauer bildete das Modell die Wachstumsvorgänge der Gerberakultur nach. Zusätzlich fand eine Berechnung der Bestimmtheitsmaße statt, bei der die durch das Modell erfasste Varianz mit der Restvarianz verglichen wurde. Je geringer die Restvarianz war, umso besser beschrieb das Modell die beobachteten Daten.

Die Übereinstimmung der Modelldaten mit den beobachteten Werten wurde mit der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate bewertet. Bei Anwendung dieser Methode musste die Bedingung zutreffen, dass die für die Berechnung der Abweichungsquadrate verwendeten Modellvariablen und beobachteten Werte in ihrer Größenordnung vergleichbar waren, damit die Gewichtung der Abweichungsquadrate innerhalb der Summe für jede Variable annähernd gleich war. Da diese Bedingung für die Erntezahlen, die um den Faktor 50 bis 100 höher waren als die Blattflächenindices, nicht zutraf, wurden diese in der Hilfsvariablen 'Ernte1' durch den Faktor 100 dividiert.

Der erste Modelldurchlauf basierte auf den Kultur- und Wachstumsdaten der zweiten Bewässerungsvariante, bei der durch kontinuierliche Überschussbewässerung von 10 bis 35 Prozent bei jedem Bewässerungsvorgang ein Ausdrainieren der Mat-

tennährlösung erzielt und so ein Ansteigen der Leitfähigkeit vermieden werden sollte (Abb. 5).

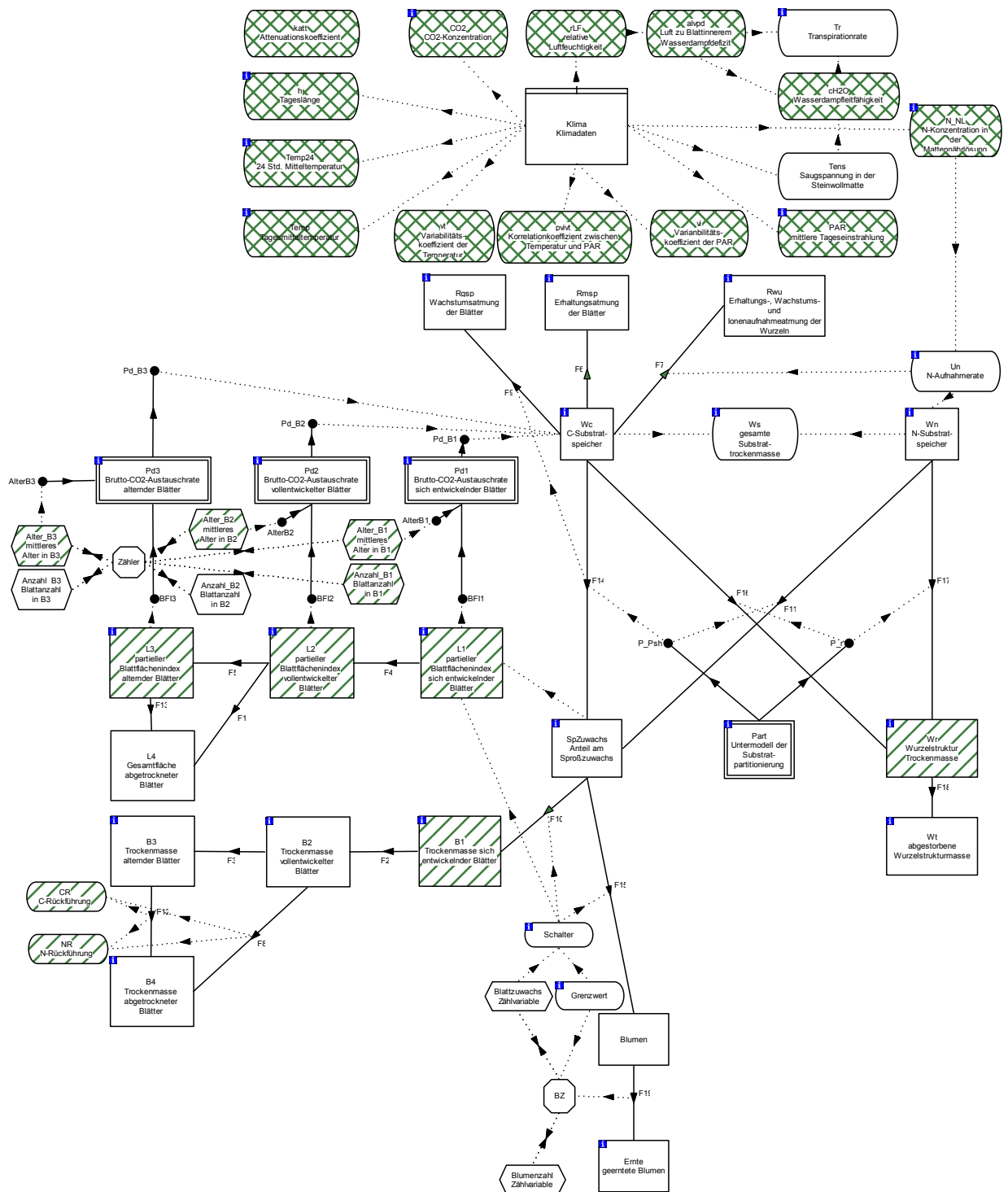


Abb. 71: Übersicht des Hauptmodells für die Gerbera-Kultur einschließlich der Verweise auf die Untermodelle PART, P_{d1}, P_{d2} und P_{d3}.

Nach dem Modelldurchlauf ergab sich für die Übereinstimmung der berechneten Modellwerte mit den beobachteten Werten für die Statusvariablen L1, L2, L3, BFI und 'Ernte' ein Bestimmtheitsmaß von B=0,57.

Des weiteren wurden die Bestimmtheitsmaße für die einzelnen Statusvariablen ermittelt. Der berechnete Blattflächenindex BFI wies bei einem Bestimmtheitsmaß

von 0,87 eine gute Übereinstimmung mit den beobachteten Blattflächen auf (Abb. 72, Tab. 5).

Bei Betrachtung der partiellen Blattflächenindices der drei Blattalterskategorien L1, L2 und L3 fiel auf, dass diese die beobachteten Werte unbefriedigend wiedergaben (Abb. 73, Tab. 5). Diese Abweichungen konnten einer mangelnden Qualität der Berechnungen des Modells nicht zugeschrieben werden. Die Ursache war im Unterschied in der Eingruppierung der Blätter in Blattalterskategorien während des Modelldurchlaufes und bei den zur Verifizierung herangezogenen Ergebnissen der Wachstumsbeobachtungen in der Gewächshauskultur zu sehen. Der Übergang zwischen den ersten beiden Blattalterskategorien ergab sich bei den Wachstumsbeobachtungen durch den subjektiv gewählten Grenzwert von 50 Tagen bis zur Vollentwicklung der Blätter, um diese in Blattalterskategorien einzuteilen. Während des Modelldurchlaufes wurde die Dauer bis ein Blatt vollentwickelt war dynamisch in Abhängigkeit von der Einstrahlungssumme durch die Variable A_{\max} bestimmt. Diese beeinflusste somit die Eingruppierung der Blätter in die entsprechenden Blattalterskategorien. Die Festlegung des Übergangs in die dritte Blattalterskategorie erfolgte im Modell wie auch bei den Wachstumsbeobachtungen durch das Grenzwertalter von 100 Tagen. Zum Zeitpunkt der Wachstumsbeobachtungen lagen die Auswertungen zur Abhängigkeit der Dauer der Blattentwicklung von der Einstrahlungssumme nicht vor, so dass eine subjektive Einteilung in Blattalterskategorien durchgeführt werden musste. Mit der unterschiedlichen Definition der Blattaltersstruktur konnte ein Teil der Abweichungen erklärt werden, so dass die partiellen Blattflächenindices nicht geeignet waren, die Qualität des Modells zu bewerten, und daher in die folgenden Analysen nicht einbezogen wurden.

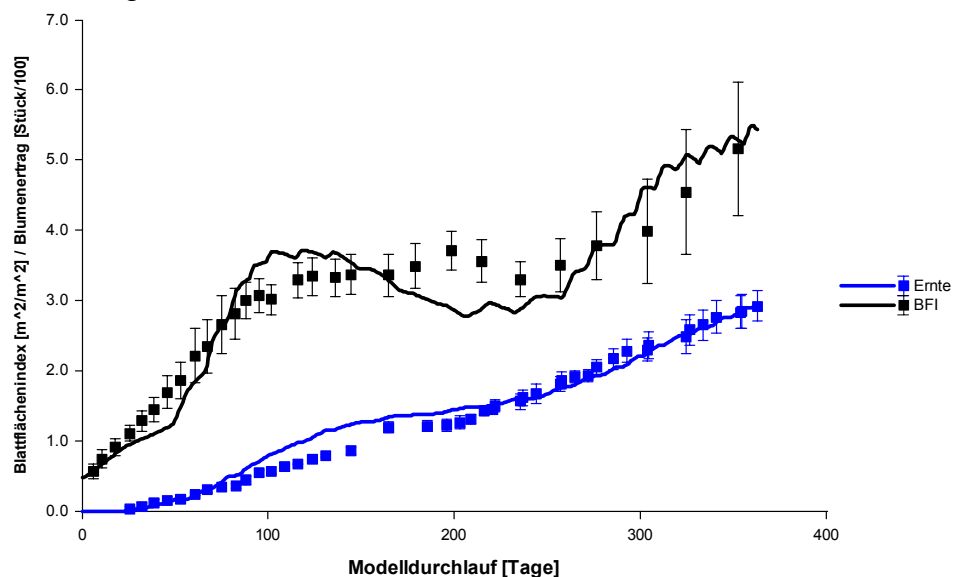


Abb. 72: Beobachtete (Messpunkte mit Standardfehler) und berechnete Modelldaten für die Statusvariablen BFI ($B=0,87$) und 'Ernte' ($B=0,97$) nach einem Modelldurchlauf unter den Klima- und Wachstumsbedingungen des Bewässerungsprüfgrundes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung.

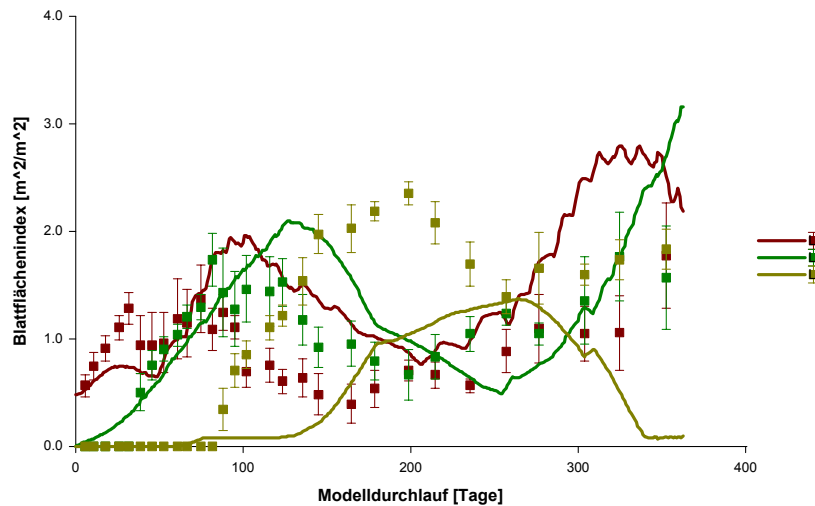


Abb. 73: : Beobachtete (Messpunkte mit Standardfehlern) und berechnete Modelldaten für die Statusvariablen L1 ($B < 0,10$), L2 ($B = 0,32$) und L3 ($B < 0,10$) nach einem Modelldurchlauf unter den Klima- und Wachstumsbedingungen des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung.

Der berechnete kumulierte Blumenertrag in der Variablen 'Ernte' zeigte bei einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,97$ trotz leichter Überschätzung zwischen dem 80. und 200. Tag eine hohe Übereinstimmung mit den beobachteten Ertragszahlen (Abb. 72). Vom gärtnerischen Gesichtspunkt aus war der Blumenertrag die bedeutendste Statusvariable der Kultur. Eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und beobachteten Ertragszahlen stellte daher eine Grundvoraussetzung für den Einsatz zur Ertragsprognose in der gärtnerischen Kultur dar. Das Bestimmtheitsmaß für die Berechnung von BFI und 'Ernte' betrug $B = 0,93$ und belegte damit die Eignung des Modells, Blumenertrag und Pflanzenwachstum unter den gegebenen Bedingungen zu simulieren.

Ein weiterer Modelldurchlauf erfolgte auf der Basis der Kultur- und Wachstumsdaten des dritten Prüfgliedes, bei dem beim ersten Bewässerungsvorgang mit starkem Überschuss bewässert wurde, um in der Matte vorhandene Nährlösung auszutauschen und bei Folgebewässerungen nur noch geringe Überschussmengen zu geben (Abb. 6).

Wie zuvor wiesen die berechneten Werte für die partiellen Blattflächenindices L1, L2 und L3 eine ungenügende Übereinstimmung mit den beobachteten Daten aus den zuvor genannten Gründen auf (Tab. 5, Anhang E, Abb. 92). Im Vergleich des Gesamtblattflächenindex BFI mit den beobachteten Werten lagen die Modellwerte zwischen dem 80. und 150. Tag sowie nach dem 300. Tag deutlich zu hoch, so dass sich ein unzureichendes Bestimmtheitsmaß von $B = 0,28$ ergab. Die Werte der Variablen 'Ernte' entsprachen den beobachteten Werten trotz leichter Überschätzung mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,86$ (Abb. 74, Tab. 5).

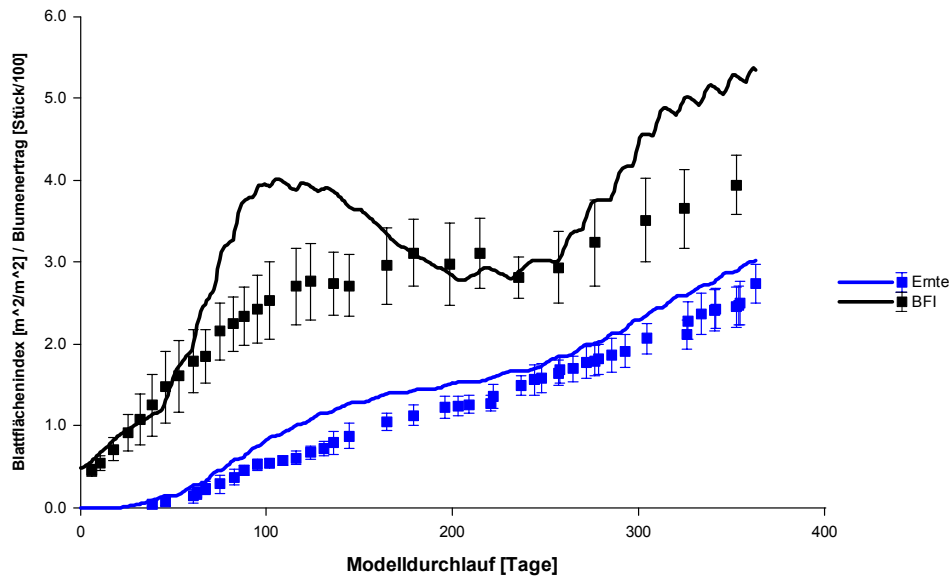


Abb. 74: Beobachtete (Messpunkte mit Standardfehler) und berechnete Modelldaten für die Statusvariablen BFI ($B=0,28$) und 'Ernte' ($B=0,86$) nach einem Modelldurchlauf unter den Klima- und Wachstumsbedingungen des Prüfgliedes mit über den Tag hinweg degressiv abnehmender Bewässerungsintensität.

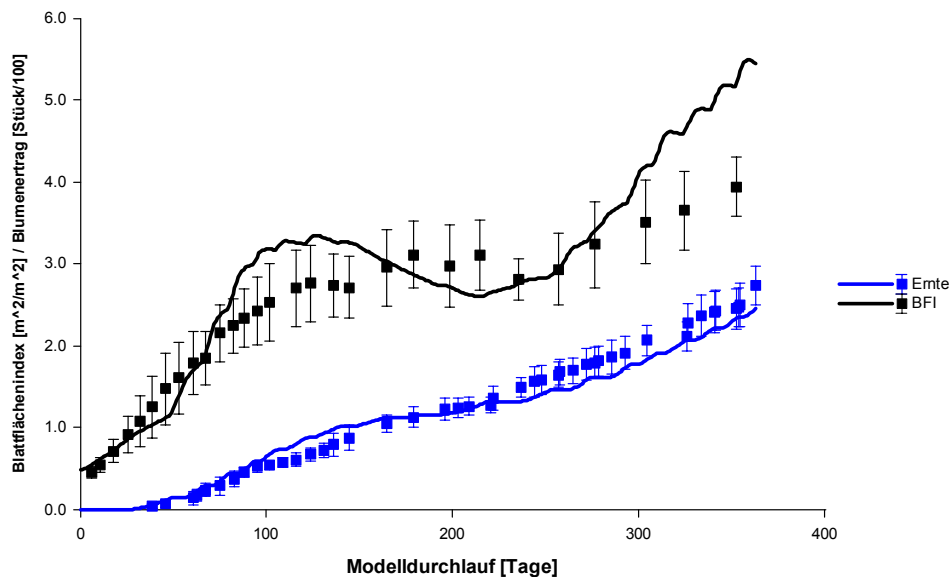


Abb. 75: Beobachtete (Messpunkte mit Standardfehler) und nach einer Optimierung der Koeffizienten p_{bz1} , p_{bz2} und f_{TG} berechnete Modelldaten für die Statusvariablen BFI ($B=0,75$) und 'Ernte' ($B=0,96$) nach einem Modelldurchlauf unter den Klima- und Wachstumsbedingungen des Prüfgliedes mit über den Tag hinweg degressiv abnehmender Bewässerungsintensität.

Die Überschätzung des Blattflächenindex und der Erntedaten ließ darauf schließen, dass sich bei der Umrechnung der Struktur Trockenmasse in Blattfläche bzw. Anzahl Blumen Abweichungen in Abhängigkeit von der Bewässerungsstrategie ergaben. Aus diesem Grund wurden mit Hilfe der Optimierungsfunktion von Model-Maker die Werte der Regressionskoeffizienten p_{bz1} und p_{bz2} für die Berechnung des Blumentrockengewichts und das spezifische Blattflächentrockengewicht f_{TG} zur Anpassung des Modells an die beobachteten Werte optimiert.

Daraus resultierten neue optimierte Koeffizienten:

$$p_{bz1} = 0,000900909$$

$$p_{bz2} = 0,333684$$

$$f_{TG} = 0,0815325$$

Nach Einsetzen der Koeffizienten in die Modellgleichungen und Ausführung eines weiteren Modelldurchlaufs konnte für die Statusvariablen BFI und 'Ernte' mit Bestimmtheitsmaßen von $B_{BFI}=0,75$ und $B_{Ernte}=0,96$ sowie $B=0,86$ für das Modell bei Berücksichtigung beider Statusvariablen eine bessere Übereinstimmung mit den beobachteten Daten festgestellt werden (Abb. 75, Tab. 5).

Ein weiterer Modelldurchlauf mit den kulturspezifischen Wachstumsdaten des Bewässerungsprüfgliedes mit Tensiometersteuerung, bei der nur soviel Wasser gegeben wurde wie die Pflanzen verbrauchten, erbrachte mit den anfangs für das Prüfglied mit kontinuierlicher Überschussbewässerung verwendeten Werten für die Regressionskoeffizienten p_{bz1} und p_{bz2} und das spezifische Blattrockengewicht f_{TG} keine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den beobachteten Werten (Abb. 76 Tab. 5). Das Bestimmtheitsmaß für die Übereinstimmung des Modells mit den Statusvariablen BFI und 'Ernte' betrug $B=0,60$, die für die einzelnen Variablen entsprechend $B_{BFI}=0,22$ und $B_{Ernte}=0,90$. Die partiellen Blattflächenindices L1, L2 und L3 erwiesen sich als nicht geeignet im Vergleich mit den beobachteten Werten (Tab. 5, Anhang E, Abb. 94).

Die Überschätzung des Blattflächenindex BFI durch das Modell fiel auf. Möglich war, dass das spezifische Blattflächentrockengewicht für das Tensiometer gesteuerte Prüfglied unterschätzt wurde, da höhere Salzkonzentrationen in der Mattennährlösung in Verbindung mit schlechterer Wasserverfügbarkeit durchaus den Trockengewichtsanteil beeinflussen haben konnten, und somit im Modell bei der Umrechnung der Struktur trockenmasse in Blattfläche eine Überschätzung des Blattflächenindex aufgetreten war. Insbesondere die unbefriedigende Wiedergabe des Blattflächenindex BFI sprach dafür, auch hier eine Optimierung der zuvor genannten Koeffizienten durchzuführen.

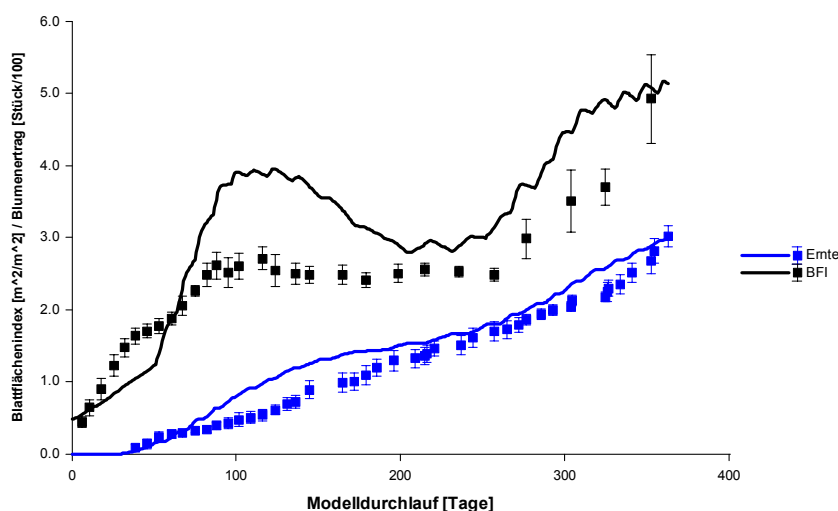


Abb. 76: Beobachtete (Messpunkte mit Standardfehler) und berechnete Modelldaten für die Statusvariablen BFI ($B=0,23$) und 'Ernte' ($B=0,90$) nach einem Modelldurchlauf unter den Klima- und Wachstumsbedingungen des Bewässerungsprüfgliedes mit bedarfsgerechter Tensiometersteuerung ohne Überschussbewässerung.

Die Optimierungsroutine berechnete für die Koeffizienten folgende Werte:

$$p_{bz1} = 0,000764786$$

$$p_{bz2} = 0,305374$$

$$f_{TG} = 0,0953274$$

Die Wiedergabe der Statusvariablen BFI und 'Ernte' mit Bestimmtheitsmaßen von $B_{BFI}=0,75$ und $B_{Ernte}=0,95$ konnte deutlich verbessert werden (Abb. 77, Tab. 5). Die Übereinstimmung der Erntedaten war gut, wogegen beim Blattflächenindex BFI immer noch eine leichte Überschätzung durch das Modell zu beobachten war.

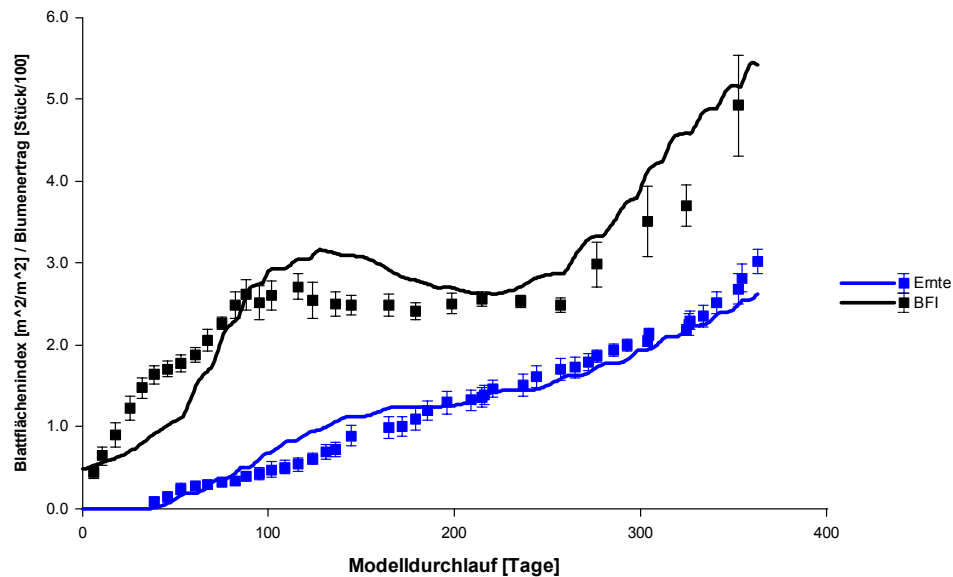


Abb. 77: Beobachtete (Messpunkte mit Standardfehler) und nach einer Optimierung der Koeffizienten p_{bz1} , p_{bz2} und f_{TG} berechnete Modelldaten für die Statusvariablen BFI ($B=0,75$) und 'Ernte' ($B=0,95$) nach einem Modelldurchlauf unter den Klima- und Wachstumsbedingungen des Bewässerungsprüfgliedes mit bedarfsgerechter Tensiometersteuerung ohne Überschussbewässerung.

Tab. 5: Berechnete Modellwerte der Statusvariablen BFI, L1, L2, L3 und 'Ernte' nach 353 Tagen des Modelldurchlaufes im Vergleich zu den in den Wachstumsbeobachtungen ermittelten Werte für Gerbera der Sorte 'Moana'.

Statusvariable	in den Wachstums beobachtungen ermittelte Werte	vom Modell berechnete Werte	vom Modell berechnete Werte bei Verwen- dung der optimier- ten Koeffizienten ¹⁾
Bewässerungsprüfglied mit bedarfsgerechter Tensiometersteuerung ohne Überschussbewässerung			
BFI	4,92 m ² m ⁻²	5,07 m ² m ⁻²	5,15 m ² m ⁻²
L1	1,54 m ² m ⁻²	2,42 m ² m ⁻²	1,67 m ² m ⁻²
L2	2,11 m ² m ⁻²	2,57 m ² m ⁻²	1,91 m ² m ⁻²
L3	1,27 m ² m ⁻²	0,08 m ² m ⁻²	1,57 m ² m ⁻²
'Ernte'	268 Blumen m ⁻²	288 Blumen m ⁻²	249 Blumen m ⁻²
Bewässerungsprüfglied mit kontinuierlicher Überschussbewässerung			
BFI	5,16 m ² m ⁻²	5,28 m ² m ⁻²	
L1	1,77 m ² m ⁻²	2,51 m ² m ⁻²	
L2	1,56 m ² m ⁻²	2,69 m ² m ⁻²	
L3	1,83 m ² m ⁻²	0,08 m ² m ⁻²	
'Ernte'	292 Blumen m ⁻²	282 Blumen m ⁻²	
Bewässerungsprüfglied mit degressiv abnehmender Bewässerungsintensität			
BFI	3,94 m ² m ⁻²	5,27 m ² m ⁻²	5,21 m ² m ⁻²
L1	1,10 m ² m ⁻²	2,49 m ² m ⁻²	1,77 m ² m ⁻²
L2	1,45 m ² m ⁻²	2,59 m ² m ⁻²	2,06 m ² m ⁻²
L3	1,39 m ² m ⁻²	0,20 m ² m ⁻²	1,38 m ² m ⁻²
'Ernte'	273 Blumen m ⁻²	289 Blumen m ⁻²	234 Blumen m ⁻²
¹⁾ p _{bz1} und p _{bz2} : Regressionskoeffizienten für die Berechnung des Blumentrockengewichts; f _{TG} : spezifisches Blattflächentrockengewicht			

5.15 Modellverhalten bei Blattverlust

Eine in dieser Arbeit berücksichtigte Eigenschaft des Modells war die Möglichkeit, auf diskontinuierliche Ereignisse wie Blattverluste durch manuelles Blattbrechen reagieren zu können und den Wachstumsverlauf zu prognostizieren. In den Modellablauf wurde daher eine Ereignisabfrage eingebaut, ob und wann ein Ausbrechen der Blätter durchgeführt und wieviel Prozent der Blattmassen bzw. -flächen in den entsprechenden Blattalterskategorien dabei entfernt werden sollten.

Das Blattbrechen wird in der Praxis üblicherweise während des Sommerhalbjahres durchgeführt, wenn die Pflanzen ausreichend Blattmasse gebildet haben. Der Zweck des Blattbrechens liegt darin, den Bestand aufzulockern, damit ihn mehr Licht und Luft durchdringen kann sowie eine Verminderung der Blütenabortion in den folgenden Wintermonaten angestrebt wird (ESCHER et al., 1996).

Zur Überprüfung der Reaktion des Modells wurden Blattbrechvorgänge in den Ablauf eingefügt. Die Klimadaten entsprachen dem Zeitraum der Wachstumsbeobachtungen. Diese fanden zu den Zeitpunkten 150 (Mitte November) und 200 Tage (Ende Dezember) nach dem Start der Modelldurchläufe statt, da im Modell in den Sommermonaten die Blattfläche noch zu gering war bzw. im zweiten Jahr nicht genügend Kultur- und Klimadaten für einen Modelldurchlauf zur Verfügung standen. Zuerst erfolgte ein Modelldurchlauf bei dem 90 % der alternden, absterbenden Blätter entfernt wurden. Ein Modelldurchlauf umfasste 365 Tage.

Bei einem Blattbrechvorgang nach 150 Tagen, bei dem 90 % der alternden, absterbenden Blätter entfernt wurden, zeigte sich, dass die Blattfläche in dieser Kategorie um den 230. Tag den Wert erreichte, den das Modell ohne Blattbrechvorgang, Kontrolldurchlauf (Run1), berechnet hatte, um danach zumeist darüber zu liegen. Bei einem Blattbrechen nach 200 Tagen wurde der Wert der Kontrolle am 300. Tag erreicht (Abb. 83). Auswirkungen waren auch bei den Blattflächenindices der anderen Blattalterskategorien festzustellen. L1 wies beim ersten Blattbrechtermin zwischen dem 200. und dem 250. Tag einen stärkeren Zuwachs als bei der Kontrolle auf, um danach deren Werten zu entsprechen. Beim zweiten Termin lag der Zuwachs an neuen Blättern ab dem 290. Tag unter den Werten der Kontrolle (Abb. 81). Bei L2 war der partielle Blattflächenindex beim ersten Blattbrechtermin ab dem 200. Tag geringer als bei der Kontrolle, danach für 50 Tage höher und nahm in der Folge vergleichbare Werte ein. Beim zweiten Termin ergab sich ein ähnlicher Verlauf der um 30 bis 50 Tage verzögert ablief (Abb. 82).

Der Blattbrechtermin Mitte November beeinflusste die Entwicklung des Blattflächenindex BFI des Bestandes nur unwesentlich. Bei einem Termin Ende Dezember war der Blattflächenzuwachs im Vergleich zur Kontrolle größer und erreichte die Werte der Kontrolle um den 300. Tag des Modelldurchlaufs (Abb. 78).

Der erste Blattbrechtermin fand unter abnehmenden Einstrahlungsbedingungen statt, der zweite dagegen unter zunehmenden. Der stärkere Blattflächenzuwachs nach dem Termin Ende Dezember schien auf die besseren Einstrahlungsbedingungen zurückzuführen zu sein. Bei der Statusvariable 'Ernte' konnten dagegen bei beiden Terminen keine Unterschiede zum Kontrolldurchlauf festgestellt werden (Abb. 79).

Ein ausschließliches Entfernen älterer Blätter wird in der Praxis nur selten möglich sein. Zumeist werden Schnittmaßnahmen durchgeführt, die nicht nur die älteren, sondern auch junge und vollentwickelte Blätter betreffen. Daher fand ein zweiter Modelldurchlauf mit Anteilen an entfernter Blattfläche von 10 % für L1, 30 % für L2 und 90 % für L3 statt (Abb. 84 bis 89).

Beim Blattbrechtermin nach 150 Tagen erreichte L1 nach 30 Tagen den Wert des Kontrolldurchlaufs, lag bis zum 230. Tag leicht darüber und danach niedriger. Die Entwicklung des partiellen Blattindex L1 unterschied sich beim zweiten Blattbrechtermin bis zum 270. Tag nur unwesentlich von der Kontrolle, nahm in der Folge aber niedrigere Werte an (Abb. 87). L2 wies nach beiden Blattbrechterminen deutlich niedrigere Werte auf als beim Kontrolldurchlauf. Nach einem Blattbrechtermin Mitte November lag L2 ständig unter den Werten der Kontrolle. Beim zweiten Termin erreichte L2 nach anfänglicher Abnahme aufgrund eines geförderten Zuwachses um den 300. Tag den partiellen Blattflächenindex der Kontrolle (Abb. 88). Der durch das Blattbrechen reduzierte partielle Blattflächenindex L3 wurde nach beiden Terminen schnell bis zum 180. bzw. 280. Tag ausgeglichen und stieg weiterhin an (Abb. 89).

Der Blattflächenindex BFI erholte sich nach beiden Terminen aufgrund eines höheren Blattflächenzuwachses bis zum 250. bzw. 300. Tag. Ab dem 300. Tag lag dieser bei beiden Modelldurchläufen über den Kontrollwerten (Abb. 84). Der Verlauf des Ertrages in der Statusvariable 'Ernte' wies nach dem Blattbrechen keinen Unterschied zur Kontrolle auf (Abb. 85).

Der Einfluss des Blattbrechens zeigte sich nicht nur bei der oberirdischen Pflanzenentwicklung. So konnte neben einem zum Teil vermehrten Zuwachs an Blattfläche nach dem Blattbrechen eine stärkere Zunahme an Wurzelstrukturmasse festgestellt werden (Abb. 80 und 86).

Ein Blattbrechtermin Ende Dezember förderte das Wachstum der Pflanzen deutlicher, als wenn dieser Mitte November durchgeführt wurde. Die zunehmende von außen einwirkende Einstrahlung nach Ende Dezember beschleunigte das Pflanzenwachstum. Der negative Einfluss der abnehmenden Einstrahlung Mitte November konnte durch das Blattbrechen und der damit verbesserten Lichtdurchdringung des Bestandes nicht vollständig ausgeglichen werden.

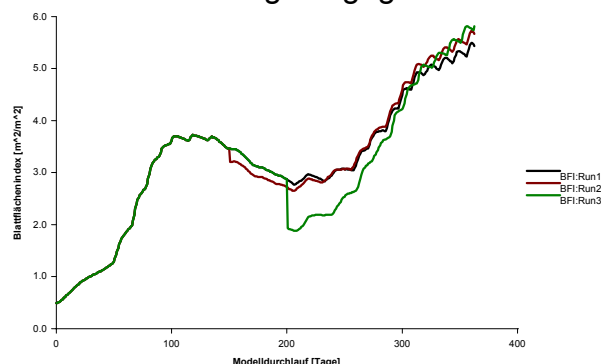


Abb. 78: Einfluss des Ausbrechens von 90 % der alternden und absterbenden Blätter (L3) am 150. Tag (Run2) und am 200. Tag (Run3) des Modelldurchlaufs auf der Basis der Modelldaten des Bewässerungsprüfgrundes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung im Vergleich zur Kontrolle ohne Ausbrechen der Gerberablätter (Run1) auf die Statusvariable BFI.

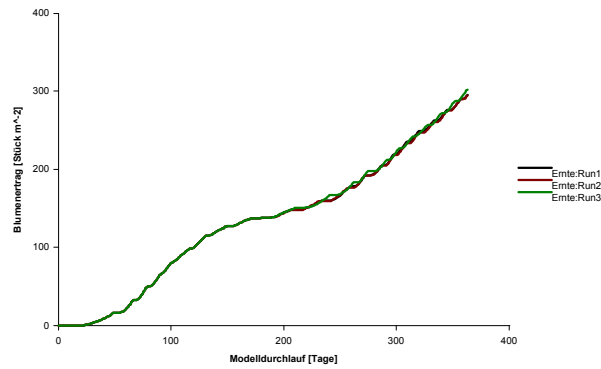


Abb. 79: Einfluss des Ausbrechens von 90 % der alternden und absterbenden Blätter (L3) am 150. Tag (Run2) und am 200. Tag (Run3) des Modelldurchlaufs auf der Basis der Modelldaten des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung im Vergleich zur Kontrolle ohne Ausbrechen der Gerberablätter (Run1) auf die Statusvariable Ernte.

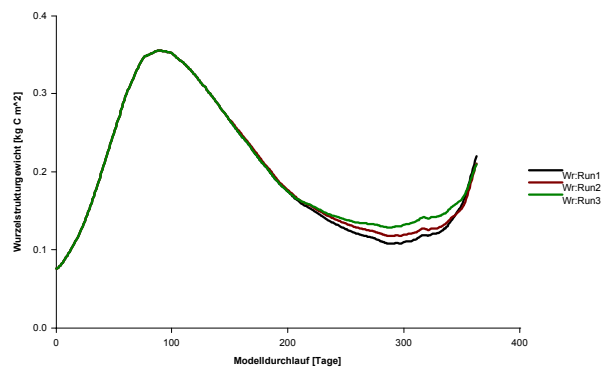


Abb. 80: Einfluss des Ausbrechens von 90 % der alternden und absterbenden Blätter (L3) am 150. Tag (Run2) und am 200. Tag (Run3) des Modelldurchlaufs auf der Basis der Modelldaten des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung im Vergleich zur Kontrolle ohne Ausbrechen der Gerberablätter (Run1) auf die Statusvariable W_r .

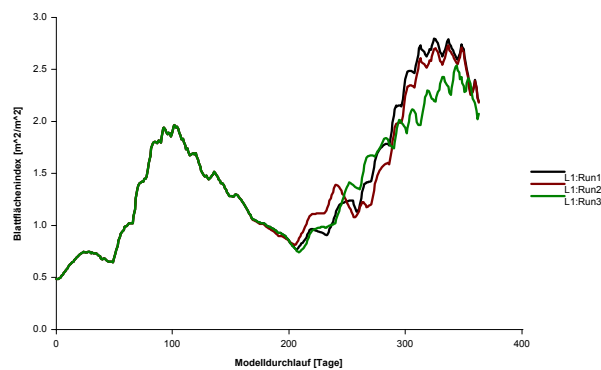


Abb. 81: Einfluss des Ausbrechens von 90 % der alternden und absterbenden Blätter (L3) am 150. Tag (Run2) und am 200. Tag (Run3) des Modelldurchlaufs auf der Basis der Modelldaten des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung im Vergleich zur Kontrolle ohne Ausbrechen der Gerberablätter (Run1) auf die Statusvariable L1.

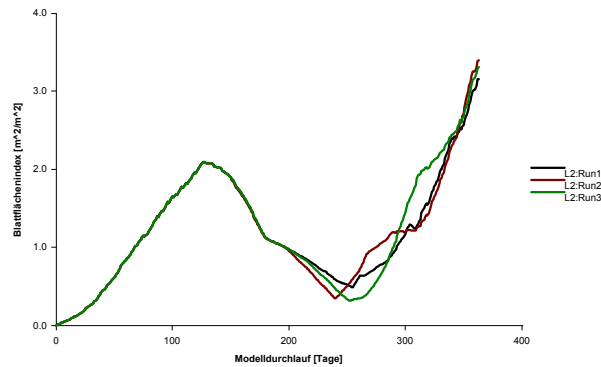


Abb. 82: Einfluss des Ausbrechens von 90 % der alternden und absterbenden Blätter (L3) am 150. Tag (Run2) und am 200. Tag (Run3) des Modelldurchlaufs auf der Basis der Modelldaten des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung im Vergleich zur Kontrolle ohne Ausbrechen der Gerberablätter (Run1) auf die Statusvariable L2.

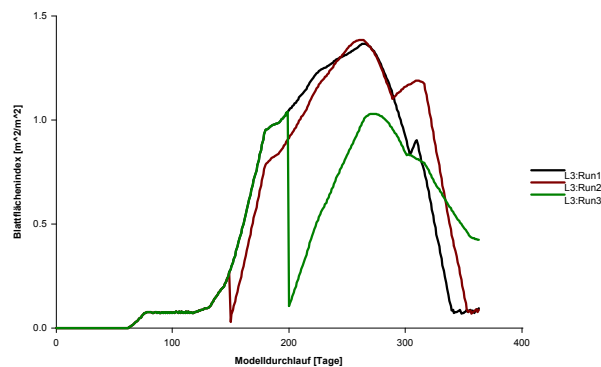


Abb. 83: Einfluss des Ausbrechens von 90 % der alternden und absterbenden Blätter (L3) am 150. Tag (Run2) und am 200. Tag (Run3) des Modelldurchlaufs auf der Basis der Modelldaten des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung im Vergleich zur Kontrolle ohne Ausbrechen der Gerberablätter (Run1) auf die Statusvariable L3.

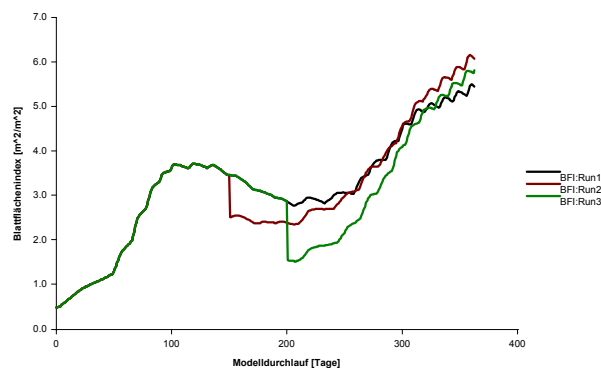


Abb. 84: Einfluss eines Ausbrechens von 10 % der jungen Blätter (L1), 30 % der vollentwickelten Blätter (L2) und 90 % der alternden und absterbenden Blätter (L3) am 150. Tag (Run2) und am 200. Tag (Run3) des Modelldurchlaufs auf der Basis der Modelldaten des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung im Vergleich zur Kontrolle ohne Ausbrechen der Gerberablätter (Run1) auf die Statusvariable BFI.

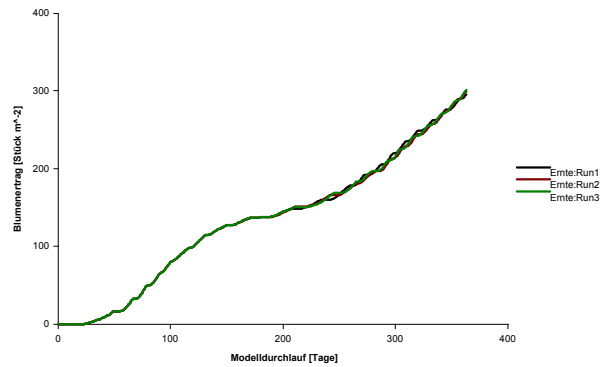


Abb. 85: Einfluss eines Ausbrechens von 10 % der jungen Blätter (L1), 30 % der vollentwickelten Blätter (L2) und 90 % der alternden und absterbenden Blätter (L3) am 150. Tag (Run2) und am 200. Tag (Run3) des Modelldurchlaufs auf der Basis der Modelldaten des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung im Vergleich zur Kontrolle ohne Ausbrechen der Gerberablätter (Run1) auf die Statusvariable Ernte.

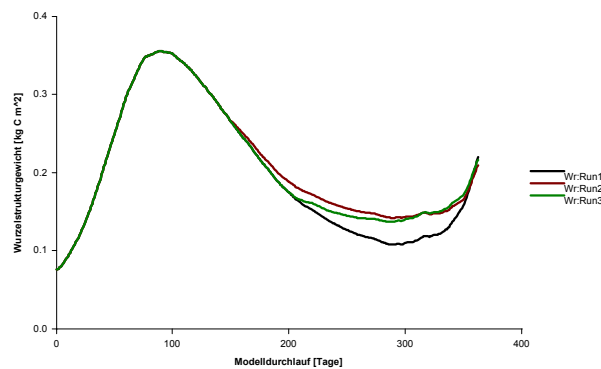


Abb. 86: Einfluss eines Ausbrechens von 10 % der jungen Blätter (L1), 30 % der vollentwickelten Blätter (L2) und 90 % der alternden und absterbenden Blätter (L3) am 150. Tag (Run2) und am 200. Tag (Run3) des Modelldurchlaufs auf der Basis der Modelldaten des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung im Vergleich zur Kontrolle ohne Ausbrechen der Gerberablätter (Run1) auf die Statusvariable W_r .

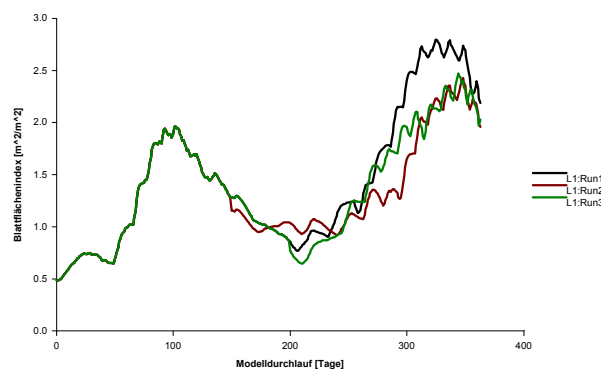


Abb. 87: Einfluss eines Ausbrechens von 10 % der jungen Blätter (L1), 30 % der vollentwickelten Blätter (L2) und 90 % der alternden und absterbenden Blätter (L3) am 150. Tag (Run2) und am 200. Tag (Run3) des Modelldurchlaufs auf der Basis der Modelldaten des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung im Vergleich zur Kontrolle ohne Ausbrechen der Gerberablätter (Run1) auf die Statusvariablen L1.

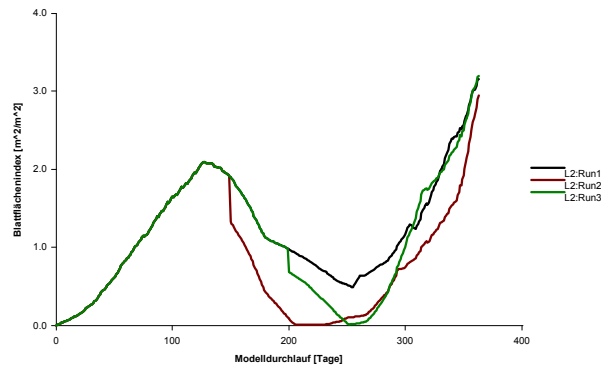


Abb. 88: Einfluss eines Ausbrechens von 10 % der jungen Blätter (L1), 30 % der vollentwickelten Blätter (L2) und 90 % der alternden und absterbenden Blätter (L3) am 150. Tag (Run2) und am 200. Tag (Run3) des Modelldurchlaufs auf der Basis der Modelldaten des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung im Vergleich zur Kontrolle ohne Ausbrechen der Gerberablätter (Run1) auf die Statusvariable L2.

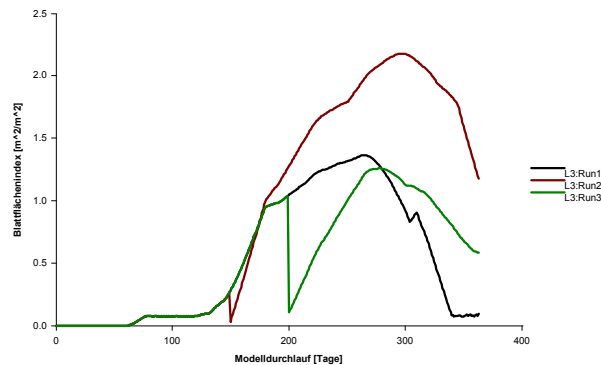


Abb. 89: Einfluss eines Ausbrechens von 10 % der jungen Blätter (L1), 30 % der vollentwickelten Blätter (L2) und 90 % der alternden und absterbenden Blätter (L3) am 150. Tag (Run2) und am 200. Tag (Run3) des Modelldurchlaufs auf der Basis der Modelldaten des Bewässerungsprüfgliedes mit kontinuierlicher Überschussbewässerung im Vergleich zur Kontrolle ohne Ausbrechen der Gerberablätter (Run1) auf die Statusvariable L3.

5.16 Ertragsoptimierung

Die Optimierung des Blumenertrages in der Gerberakultur war von besonderer Bedeutung. Für die folgenden Computerberechnungen erfolgte eine Umstellung des Gerberamodells, um eine Maximierung des Blumenertrages in Abhängigkeit von definierten Klima- und Wachstumsparameter durchführen zu können. Zu diesem Zweck wurde im Modell die Verbindung zu den aufgezeichneten Klimadaten des Beobachtungszeitraumes aufgehoben und durch die Möglichkeit ersetzt, konstante Werte für die mittlere Temperatur während der Lichtphase, die 24-Stunden-Tagesmitteltemperatur, Tageslänge, CO₂-Konzentration der Luft, relative Luftfeuchtigkeit, mittlere PAR-Einstrahlungsintensität, Mattensaugspannung und die Stickstoffkonzentration in der Mattennährlösung einzugeben.

Innerhalb der Software ModelMaker konnten Parameter mit Hilfe der Simplex-Methode so optimiert werden, dass eine definierte Komponente des Modells ein Minimum erreichte (Walker, 1997). Da im vorliegenden Fall ein Maximum bestimmt

werden sollte, wurde die Hilfsvariable 'Ernte1' negativ berechnet, um somit die Minimierungsfunktion zur Maximierung des Ertrages zu verwenden.

Um die Umweltparameter zu optimieren, wurden diesen Multiplikatoren zugeordnet, die deren Werte veränderten. Vor einer Simplex-Minimierung oder, falls selbst gewählte Werte für die Umweltfaktoren eingesetzt und im Modell überprüft werden sollten, setzte man die Multiplikatoren auf eins, um einen Einfluss auf die Werte der Umweltfaktoren auszuschließen.

Tab. 6: Klima- und Wachstumsfaktoren vor Durchführung der Maximierung, deren optimierte Multiplikatoren und die ermittelten Werte, mit denen nach 200 Tagen Modellzeit ein maximaler Blumenertrag berechnet werden konnte.

Umweltparameter	Modellkürzel des Umweltfaktors	Werte vor der Maximierung	Modellkürzel der Multiplikatoren	optimierte Werte der Multiplikatoren	Werte nach der Maximierung
mittlere Temperatur während der Lichtphase	Temp	20 °C	xtemp	0,912	18,25 °C
24-Stunden-Tagesmitteltemperatur	Temp24	18 °C	xtemp24	0,951	17,12 °C
Tageslänge	h	43200 s	xh	1,242	53650 s
CO ₂ -Konzentration der Luft	CO2	6,2E-04 kg m ⁻³ (335 ppm)	xco2	1,841	1,142E-03 kg m ⁻³ (620 ppm)
relative Luftfeuchtigkeit	rLF	50 %	xrlf	1,610	80,5 %
mittlere PAR-Einstrahlungsintensität	PAR	100 W m ⁻²	xpar	1,021	102,10 W m ⁻²
Saugspannung in der Matte	Tens	20 hPa	xtens	0,878	17,56 hPa
Stickstoff-Konzentration in der Mattennährlösung	N_NL	1,5E-04 kg N l ⁻¹ (150 mg N l ⁻¹)	xnnl	1,042	1,5627E-04 kg N l ⁻¹ (156 mg N l ⁻¹)

Nach Ausführung der Maximierungsroutine ergab sich im Vergleich zu einem Modelldurchlauf mit entsprechend für eine Gerberakultur subjektiv gewählten Werten für die Umweltfaktoren eine deutliche Verbesserung der Ertragsleistung. In Tab. 6 sind die im Modell als Basiswerte gewählten Werte für die Umweltfaktoren, die optimierte Multiplikatoren und die nach der Maximierung optimalen Werte für die Einstellung der Klima- und Wachstumsfaktoren aufgeführt.

Die berechneten Optimalwerte für die Klima- und Wachstumsfaktoren führten bei einem Modelldurchlauf über 200 Tage unter konstanten Umweltbedingungen zu einem um 60,3 % erhöhten Blumenertrag je Quadratmeter bei einer Steigerung von 277 auf 444 Blumen m⁻² (Abb. 90). Bei den partiellen Blattflächenindices zeigte sich, dass insbesondere die Blattfläche an jungen Blättern gegenüber dem ersten Modelldurchlauf erhöht war. Die Blattflächenindices der anderen Blattalterskategorien, L2 und L3, unterschieden sich nur unwesentlich von den Werten vor der Optimierung (Abb. 91).

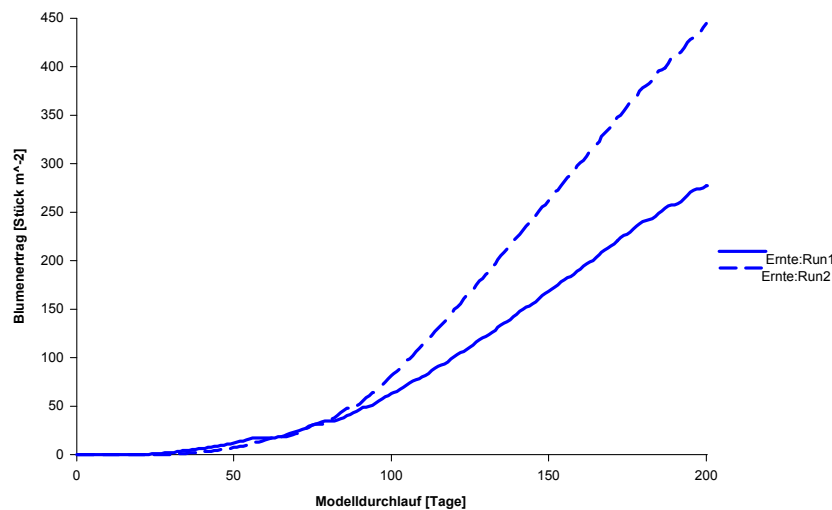


Abb. 90: Berechneter Ertragsverlauf im Modell für *Gerbera jamesonii* 'Moana' bei entsprechend der Kultur gewählten Werten für die Klima- und Wachstumsfaktoren (Run1) im Vergleich zum Ertragsverlauf nach Optimierung der Multiplikatoren (Run2).

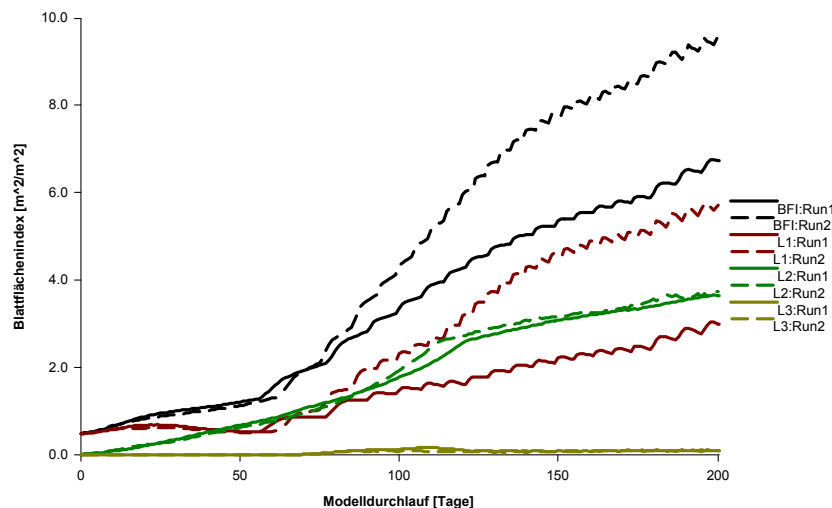


Abb. 91: Berechnete Blattflächenindizes im Modell für *Gerbera jamesonii* 'Moana' bei entsprechend der Kultur gewählten Werten für die Klima- und Wachstumsfaktoren (Run1) im Vergleich zum berechneten Wachstum nach Optimierung der Multiplikatoren (Run2).

Entsprechend dem höheren partiellen Blattflächenindex L1 wies der Gesamtblattflächenindex BFI nach der Optimierung nach 200 Tagen einen höheren Wert auf (Abb. 91).

Die Ursachen für den Anstieg des Ertrages waren den optimierten Werten für die Klima- und Wachstumsfaktoren nur zum Teil zu entnehmen. Die vielschichtigen Wechselwirkungen zwischen den Umweltfaktoren wurden in das Modell eingearbeitet und sind nicht einzeln zu betrachten. Die Werte der Umweltfaktoren führten aufgrund einer optimierten Photosyntheseleistung und N-Aufnahme zu entsprechend hohen C- und N-Substratmengen, die die Voraussetzung für die Zunahme an jungen Blättern im partiellen Blattflächenindex L1 und damit dem Anstieg an geernteten Blumen war.

Insbesondere das einzustellende Angebot von CO₂ und Stickstoff wurde durch die Maximierungsroutine erhöht (Tab. 6). Die CO₂-Konzentration von 620 ppm bestätigte

dabei die Werte von 600 bzw. 700 ppm, die von ESCHER et al. (1996) empfohlen wurden, wobei bedacht werden muss, dass das berechnete Ergebnis eine sortenspezifische Reaktion der untersuchten Sorte 'Moana' sein kann. Eine Stickstoffkonzentration von 156 mg N l^{-1} entsprach $690 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ und lag damit etwas über dem Optimalbereich von 180 bis $660 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$, der bei den Messungen der apparenten Netto- CO_2 -Austauschraten in Abschnitt 5.11.4 ermittelt wurde.

Die optimale Temperatur tagsüber nahm mit $18,3^\circ\text{C}$ einen höheren Wert an als die Nachttemperatur, deren Wert sich aus dem 24-Stundenmittelwert von $17,1^\circ\text{C}$ bei einer Tageslänge von 14,9 Stunden mit $15,3^\circ\text{C}$ ergab. ESCHER et al. (1996) gaben vergleichbare Werte an, wobei die Autoren für den Tag Temperaturen von 18 bis 25°C in Abhängigkeit von der Einstrahlung empfohlen und die optimale Nachttemperatur im Bereich um 15°C bezifferten. VAN OS et al. (1989 b) hätten dagegen konstante Tag-/Nachttemperaturen von 18°C bevorzugt.

Die berechnete optimale relative Luftfeuchtigkeit von 80,5 % lag hoch, entsprach dennoch den Angaben von ESCHER et al. (1996) im Bereich von 80 bis 85 %. Eine hohe relative Luftfeuchtigkeit würde jedoch Krankheitserregern wie *Botrytis* gute Vermehrungsbedingungen bieten, so dass von der Praxis niedrigere Werte anzustreben wären.

Der Saugspannungswert von 17,6 hPa lag im Bereich des anfangs gewählten Wertes und bestätigte, dass die Steinwollmatten nicht abtrocknen dürfen und immer ausreichend Nährlösung für die Versorgung der Gerbera enthalten müssen.

Die optimale mittlere Einstrahlungsintensität für die Gerbera schien mit $102,1 \text{ W m}^{-2}$ niedrig zu liegen. In die Modellberechnungen wurde die Einstrahlungsintensität im Tagesverlauf über eine Annäherungsfunktion mit Hilfe des Variabilitätskoeffizienten einbezogen und verrechnet, so dass bei einem mittleren Wert von $102,1 \text{ W m}^{-2}$ PAR ein Maximum von $160,4 \text{ W m}^{-2}$ PAR enthalten war sowie minimale Werte, die gegen Null tendierten (THORNLEY und JOHNSON, 1990; VON WILLERT, 1995). Der für die Optimierung verwendete Variabilitätskoeffizient der Einstrahlungsintensität errechnete sich als Mittelwert aus den Aufzeichnungen des Beobachtungszeitraumes. Die berechneten Mittelwerte für die Einstrahlung lagen dennoch auf einem niedrigen Niveau, das noch unterhalb der Sättigungseinstrahlung für die apparente Netto- CO_2 -Austauschrate lag. In den Temperaturmessreihen in Abschnitt 5.11.1 wurde bei 20°C und 412 ppm CO_2 eine Sättigung erst ab 160 W m^{-2} PAR (Abb. 27) und bei der Steigerung der CO_2 -Konzentration in Abschnitt 5.11.2 bei 20°C und 550 ppm CO_2 ab 180 W m^{-2} PAR beobachtet. Nur der maximale Einstrahlungswert entsprach der sättigenden Einstrahlung der Photosynthese. Die Modellberechnungen wiesen daraufhin, dass eine sättigende Einstrahlungsintensität über den gesamten Tagesverlauf nicht notwendig war, um maximale Erträge zu produzieren.

6 Diskussion und Schlussfolgerungen

6.1 Kurzübersicht über den Kenntnisstand und abgeleitetes Ziel der Arbeit

Simulationsmodelle werden für die vereinfachte Darstellung dynamischer Sachverhalte in verschiedenen Bereichen der Wissenschaft verwendet. In der Pflanzenphysiologie und den Agrarwissenschaften entwickelte man Modelle, um Vorgänge der Photosynthese- oder des Wachstums wiederzugeben. Sie stützten sich zumeist auf Teilbereiche der Pflanzenphysiologie bzw. der -entwicklung, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten.

Eine Darstellung der Auswirkungen äußerer Einflussgrößen auf das Wachstum und physiologische Leistungsgrößen einschließlich deren Interaktionen kann nur in einem Modell erfolgen. Für die Gerberakultur waren die für eine Modellerstellung notwendigen Untersuchungsergebnisse und Daten bislang nicht vorhanden. Eine computergestützte Simulation einer gärtnerischen Kultur unter variablen Klimabedingungen, welche die Vorgänge der Photosynthese in Verbindung mit in der Folge ablaufenden vegetativen und generativen Wachstumsprozessen verbindet, existierte nicht.

Ziel dieser Arbeit war es, ein Simulationsmodell für eine Gerbera-Hydrokultur auf Steinwollmatten am Beispiel der Sorte 'Moana' zu erstellen. Einflüsse der im Gewächshaus von außen auf die Pflanzen einwirkenden Wachstumsfaktoren wie Temperatur, Lichteinstrahlung, CO₂-Konzentration, relative Luftfeuchtigkeit, Wasser- und Stickstoffversorgung auf Photosynthese, Wachstum und Ertrag sollten dargestellt werden.

Für die Praxis sollte das Modell eine Möglichkeit schaffen, unter variablen Umweltbedingungen eine Optimierung der Wachstumsparameter zur Verbesserung der Produktivität zu erreichen. In den wenigsten Betrieben der Praxis können optimale Wachstumsbedingungen für die Kulturpflanzen eingehalten werden. Zudem verwendet man konstante Sollwerte für die Klimabedingungen ohne auf variable äußere Einflussgrößen zu reagieren. Das Modell sollte als Hilfsmittel dienen, unter einzugebenen nicht steuerbaren äußeren Einflussgrößen, wie die natürliche Einstrahlung oder durch technische Hemmnisse nicht zu erreichende Gewächshausklimagrößen, optimale Einstellwerte für beeinflussbare Parameter zu berechnen und damit den größtmöglichen Ertrag zu erzielen.

Des weiteren war es das Anliegen, Auswirkungen diskontinuierlicher Ereignisse im Kulturablauf, wie das Blattbrechen während der Kultur, anhand von Wachstumsprognosen darzustellen. Anhand des Beispiels des Blattbrechens sollte gezeigt werden, ob das Modell in der Lage ist, das Wachstum im weiteren zeitlichen Verlauf zu simulieren, und ob Empfehlungen für den Zeitraum zur Durchführung dieser Kulturmaßnahme gegeben werden können.

6.2 Ergebnis der Modellierung

In dieser Arbeit wurde ein Simulationsmodell für die Gerberakultur erstellt. Auf der Basis der Auswirkungen verschiedener äußerer Einflussgrößen auf Photosynthese und Stickstoffaufnahme erfolgten die Berechnungen der für Wachstums- und Atmungsvorgänge verfügbaren C- und N-Verbindungen. Aufgrund der Ergebnisse von Beobachtungen an Versuchspflanzen wurde das Wachstum von Blättern, Wurzeln

und Blumen modelliert und mit Massenflüssen innerhalb des Pflanzenmodells sichtbar gemacht.

Ein Vergleich berechneter Werte mit während einer Gerberakultur im Gewächshaus aufgezeichneten Daten des ersten Kulturjahres zeigte, dass das Gerberamodell geeignet war, die Kultur unter den gegebenen Umweltbedingungen zu simulieren. Die Wachstumsverläufe der Blattflächen und des Blumenertrags stimmten mit den beobachteten Daten der Gerberakultur überein.

Das Modell bot dem Anwender die Möglichkeit, diskontinuierliche Ereignisse wie das Entfernen absterbender Blätter in den Modellablauf einzubinden und eine Wachstumsprognose zu erstellen. Es war in der Lage, im Vergleich zweier geprüfter Blattbrechtermine unter Berücksichtigung einer Wachstums- und Ertragsprognose einen Zeitraum für diese Kulturmaßnahme zu empfehlen. Als Aussage für die Praxis konnte beim Vergleich der Termine Mitte November und Ende Dezember dem zweiten der Vorzug gegeben werden, da der Vorteil der besseren Lichtdurchdringung des Bestandes unter zunehmenden Einstrahlungssummen hinsichtlich der Förderung des Wachstums deutlicher war. Termine vor Mitte November oder im folgenden Sommerhalbjahr konnten nicht getestet werden, da die Pflanzen im Modell für eine Blattbrechmaßnahme noch nicht genügend Blattmasse gebildet hatten bzw. für eine Wachstumsprognose ab Juni des zweiten Jahres keine Klima- und Kulturdaten zur Verfügung standen. Aus den Modelldurchläufen resultierte, dass Blattbrechvorgänge in der Praxis nur durchgeführt werden sollten, wenn ausreichende Einstrahlungssintensitäten für Wachstum und Entwicklung gegeben sind.

Für die Kulturführung wurden optimale Klimaparameter berechnet, so dass die Fähigkeit des Modells belegt werden konnte, unter variabel einzustellenden äußeren Einflussgrößen einzelne zu optimieren. Damit konnte das Modell als Hilfsmittel zur Berechnung der Sollwerte der Klimaparameter für optimale Erträge unter nichtbeeinflussbaren äußeren Umweltgrößen herangezogen werden.

In der Praxis sind Sollwerteinstellungen für die Temperatur von 16 bis 18 °C üblich. Die relative Luftfeuchtigkeit wird versucht, über Heizen und Lüften niedrig zu halten, um Verbreitungen von Krankheiten zu verhindern und die Pflanzen verdunstungsaktiv zu halten (BRAUNSMANN, 1998). Eine Assimilationsbelichtung erfolgt im Winter bis zu 16 Stunden mit Beleuchtungsstärken von 1500 bis 3000 lux und einer ergänzenden CO₂-Düngung auf 600 bis 800 ppm.

In den Modelldurchläufen zur Optimierung der Klimaparameter wurde berechnet, dass eine Spreizung der Temperatursollwerte auf 18 °C tags und 15 °C nachts bei hohen relativen Luftfeuchtigkeiten um 80 % zu höheren Erträgen führen könnte. Der Förderung eines Botrytis-Befalls durch hohe relative Luftfeuchten könnte durch kontinuierliches Blattbrechen von älteren Blättern und abgestorbenem Blattmaterial zur besseren Licht- und Luftdurchdringung des Bestandes entgegengewirkt werden.

Bedenkt man, dass die Temperaturen im Wurzelraum denen der umgebenen Luft folgten, ergab sich ein Widerspruch zu Versuchsergebnissen von RICHTER und MATSCHKE (2000), die in Versuchen mit Gerbera höhere Erträge feststellten, wenn die Wurzelraumtemperatur über eine Zusatzheizung auf 25 °C angehoben wurde. In diesem Fall führte der Einfluss von Phytohormonen wie den wachstumsbeeinflussenden Cytokinen, die in den Wurzelspitzen gebildet werden, zu einer erhöhten Produktionsleistung der Gerbera. Es wurde darauf hingewiesen, dass die höchste Atmungsaktivität der Wurzelspitzen im Bereich von 23 bis 25 °C lag. Der Einfluss von Phytohormonen wurde noch nicht in das Modell einbezogen, könnte aber nach Durchführung weiterer Versuche berücksichtigt werden.

Während des Winters würde eine Assimilationsbelichtung bis zu 15 Stunden ausreichen. Eine zusätzliche CO₂-Düngung sollte nur bei ausreichenden Einstrahlungs-

intensitäten erfolgen, da positive Effekte auf die Photosyntheseleistung bei Lichtmangel zunehmend geringer werden. Das Modell wies damit auf Einsparungspotentiale bei den Kosten der Kulturführung hin, da die Produktionsmittel Licht und CO_2 einen erheblichen Teil der Kosten während der Winterkultur ausmachen.

Das durch äußere Einflussgrößen gesteuerte Modell hielt einem Vergleich mit der realen Kultur stand, so dass es als Prognoseinstrument zur Vorhersage der Reaktionen des Pflanzenbestandes auf unterschiedliche Umweltbedingungen herangezogen werden kann und somit Praxis und Forschung als Hilfsmittel zur Optimierung der Kulturverfahren dient.

Ein weiterer Nutzen für die Versuchsarbeit in gartenbaulichen Forschungseinrichtungen entstand dadurch, dass einzelne Kulturparameter bezüglich ihres Einflusses auf die Kultur bereits im Modell getestet werden können und so die Auswahl von Prüffaktoren, deren Kombinationen und Wertebereiche sinnvoll erfolgen kann.

6.3 Erstellung und Funktionsweise des Gerberamodells

Die Basis für die Entwicklung des Modells wurde aufgrund von Wachstumsbeobachtungen im Zusammenhang mit Klimaaufzeichnungen und Daten der Wasser- und Nährstoffversorgung gelegt. Daraus resultierten nicht nur Werte, die zur Verifizierung des Modells herangezogen werden sollten, sondern auch solche über das räumliche Wachstum der Gerbera und den Verlauf des vegetativen und generativen Wachstums in Abhängigkeit von der Zeit und der Umweltfaktoren. Diese Daten gingen in die Berechnungen der Lichtdurchdringung des Bestandes und in die Simulation des Blatt- und Blumenwachstums ein.

Die Wachstumsbeobachtungen hinsichtlich des Blatt- und Blumenwachstums fanden in einem Gerberabestand innerhalb eines Gewächshauses statt. Ebenso wurden alle Gaswechsellmessungen im Gewächshaus durchgeführt. Die Bedingungen in der Messküvette wichen entsprechend der Versuchsanstellung von den äußeren ab. Der Grund dafür war, dass das Modell auf der Basis äußerer Einflussgrößen entwickelt werden sollte, die in der Praxis über gängige Klimacomputer zur Verfügung stehen. Von Bedeutung war, dass die Untersuchungen am Gartenbauzentrum Westfalen-Lippe in einer gartenbaulichen Versuchsanstalt mit praxisnaher technischer Ausstattung unter Zuhilfenahme einer mobilen Gaswechsellmessstation durchgeführt wurden.

Der erste Schritt der Modellierung orientierte sich auf die Simulation der Photosynthese bzw. der Brutto- CO_2 -Austauschrate des Bestandes. Das Gleichungssystem basierte auf Berechnungen der täglichen Brutto- CO_2 -Austauschrate eines Bestandes wie sie von JOHNSON und THORNLEY (1984) für C_3 -Pflanzen dargestellt wurden. Bei den Berechnungen fand eine Funktion Verwendung, die in Abhängigkeit von drei physiologisch bedeutenden Parametern die Brutto- CO_2 -Austauschrate bestimmte:

- P_m , der Grenzwert der Brutto- CO_2 -Austauschrate bei sättigender Einstrahlung
- α , die photochemische Effizienz als Steigung der Funktion der CO_2 -Austauschrate bei einer Einstrahlungsintensität gegen Null
- θ , das Verhältnis des physikalischen Widerstandes der CO_2 -Diffusion in das Blatt zum Gesamtwiderstand, resultierend aus dem physikalischen Widerstand der CO_2 -Diffusion und dem Carboxylierungswiderstand der biochemischen Reaktion.

Die Auswirkungen äußerer Einflussgrößen auf die Photosyntheseparameter wurden im Modell durch eigens für die Gerberakultur entwickelte mathematische Gleichungen berechnet. Dafür notwendige Auswertungen der Ergebnisse der Gaswechsellmessungen erfolgten mit Hilfe einer Gleichung von MARSHALL und BISCOE

(1980 a) zur Berechnung der Netto-CO₂-Austauschrate, um nicht nur den Einfluss der Umweltbedingungen auf die Photosyntheseparameter α , θ und P_m zu bestimmen, sondern auch, um Informationen über die Dunkelatmungsrate R_d zu erhalten. Zudem waren die Gleichungen aus technischer Sicht geeigneter, da das Gaswechselsmesssystem HCM-1000 die apparente Netto-CO₂-Austauschrate als Messwert ausgab.

Aus Gründen der Vereinfachung wurde im Modell angenommen, dass die Brutto-CO₂-Austauschrate sich aus Netto-CO₂-Austauschrate und Dunkelatmungsrate zusammensetzte. Photorespirationsvorgänge wurden nicht berücksichtigt. Sie waren dennoch indirekt in den Messungen der apparenten Netto-CO₂-Austauschrate enthalten. Die verwendeten Gleichungssysteme unterschieden bei der Anpassung der Photosyntheseparameter nicht zwischen CO₂-Verlusten aus der Dunkelatmung und der Photorespiration.

Zur Ermittlung der Brutto-CO₂-Austauschrate des Bestandes gliederte sich die Blattfläche des Bestandes in Blattalterskategorien. An den Gerberapflanzen befanden sich Blätter, die bis zu 250 Tage alt waren, so dass es sinnvoll erschien, drei Alterskategorien zu berücksichtigen:

- junge, sich entwickelnde Blätter
- voll entwickelte Blätter ohne sichtbare Alterserscheinungen
- alternde, absterbende Blätter, deren photosynthetische Leistung zunehmend abnahm.

Die Brutto-CO₂-Austauschraten wurden in für jede Blattalterskategorie eingerichteten Untermodellen unter Berücksichtigung der Lichtdurchdringung des Bestandes und des mittleren Blattalters berechnet, an das übergeordnete Hauptmodell weitergegeben und in einem Substratspeicher für assimilierten Kohlenstoff zusammengeführt. Die aus der Photosynthese gewonnenen Kohlenstoffassimilate konnten von der Pflanze für Wachstums- und Atmungsvorgänge genutzt werden. In das Modell eingebunden war als C-Substratquelle eine verallgemeinerte Form eines Kohlenhydrates (CH₂O) (REYNOLDS und THORNLEY, 1982).

Die im pflanzeigenen Speicher verfügbare N-Substratquelle war Nitrat (NO₃). Die N-Aufnahme wurde von JOHNSON (1985) in einer mathematischen Gleichung durch eine Standardbeziehung der Enzym-Substrat-Kinetik beschrieben, wobei die Reaktionsgeschwindigkeit vom Vorhandensein zweier konkurrierender Inhibitoren abhängig war. Eine vergleichbare Funktion verwendete das Modell für die Steuerung der N-Aufnahme der Gerbera, so dass diese durch C-Substratmangel oder hohe N-Substrat-Konzentrationen gehemmt und durch geringe N-Substrat-Gehalte gefördert wurde.

Eine Differenzierung der Wurzelmasse nach Alterskriterien entsprechend der Blattmasse entfiel, da keine Daten zur Verfügung standen. Für die Abschätzung der für die Berechnung der N-Aufnahme notwendigen potentiellen Wurzelaktivität verwendete das Modell in Abhängigkeit der Salz- bzw. N-Konzentrationen in der Mattenlösung ermittelte Daten der Wurzelatmungsmessungen.

Die Atmung der Blattflächen wurde in Erhaltungs- und Wachstumsatmung unterteilt und in Abhängigkeit von Blattalter und Zuwachs berücksichtigt. Bei den Wurzeln erfolgte außer für zuvor genannte Bestandteile der Atmung eine Berechnung des C-Verbrauches bei der Atmung zur Energiefreisetzung für die Nährstoffaufnahme.

Ein Ergebnis dieser Arbeit war, dass Gleichungssysteme für die Berechnung der C- und N-Aufnahme, die in der Literatur theoretisch beschrieben wurden, angewandt, rekombiniert, ergänzt und an die Gerberakultur angepasst werden konnten,

um die für die Wachstums- und Atmungsvorgänge verfügbaren Substratmengen in Abhängigkeit variabler äußerer Einflussgrößen zu berechnen.

Das Verhältnis von Spross- zu Wurzelaktivität des Bestandes bzw. von Photosyntheseleistung zu Wurzelatmung war abhängig vom Verhältnis der Spross- und Wurzelmassen. Die C- und N-Substrat-Konzentrationen im Speicher der Pflanze, die für Wachstum zur Verfügung standen, hingen von beiden Verhältnisgrößen ab (HILPERT et al., 1991). Die Partitionierung beider Substrate auf das Wachstum von Spross und Wurzel folgte einem Berechnungsschema von THORNLEY und JOHNSON (1990).

Unter der Annahme, dass Pflanzen bestrebt sind, ein spezifisches Spross- zu Wurzelmassenverhältnis aufrecht zu erhalten, um immer ausreichend Substrate für Wachstums- und Energiegewinnungsvorgänge im richtigen Verhältnis vorrätig zu haben, steuerte eine Funktion die Partitionierung der Substrate und den Zuwachs so, dass ein Gleichgewicht entstand. Die für das Wachstum zur Verfügung stehenden C- und N-Substrate wurden in Abhängigkeit der vorhandenen Spross- und Wurzelmassen verteilt. Das Verhältnis von C- zu N-Substrat im Speicher der Pflanze beeinflusste die Partitionierung so, dass bei geringen C-Substratkonzentrationen das Sprosswachstum bzw. bei N-Substratmangel das Wurzelwachstum gefördert wurde. Eine direkte Beeinflussung der Substrat-Partitionierung durch äußere Einflussgrößen bestand nicht, da sich diese bereits auf die Aktivität der Spross- und Wurzelmassen, und damit auf das C- zu N-Substrat-Verhältnis auswirkten.

Nach der Partitionierung des Zuwachspotentials auf Spross und Wurzel war bei der Gerberakultur die Betrachtung des vegetativen und generativen Wachstums von Bedeutung, da die Anzahl der geernteten Blumen den Kulturerfolg bestimmten. Anhand der Wachstumsbeobachtungen wurde gezeigt, dass die Blumenentwicklung eine entsprechende Anzahl an zuvor entwickelten Blättern und damit entsprechende Blatt- bzw. Assimilationsfläche voraussetzte. Ein Teilmodell zur Simulation des Übergangs zwischen überwiegend vegetativem oder generativem Wachstum wurde für die Gerbera erstmals entwickelt.

Eine Abhängigkeit der Blühinduktion der Gerbera von äußeren Einflussgrößen konnte bislang nicht eindeutig geklärt werden, wobei bekannt ist, dass einwirkende Umweltfaktoren, wie z. B. Tageslänge und Lichtsumme, eine Förderung bzw. Hemmung bewirken können (BOWE et al., 1969; PENNINGSFELD und FORCHTHAMMER, 1980). Eigene Beobachtungen belegen, dass nach Abschluss der juvenilen Phase die Ausbildung einer bestimmten Zahl von Blättern entscheidend für die Blumenbildung ist. Dabei müsste die Notwendigkeit eines ausgewogenen Kohlenstoff/Protein-Haushaltes und der Phytohormonstatus der Pflanze berücksichtigt werden (LEFFRING, 1981; LARCHER, 1994). Ein Hinweis auf die Bedeutung des Kohlenstoff/Protein-Haushaltes ergab sich daraus, dass sich in Zeiten geringerer Einstrahlungsintensitäten und damit geringerer C- zu N-Verhältnisse in der Pflanze mehr Blätter bildeten, bevor Blumen entwickelt wurden. Ebenso nahm die Anzahl an vor der Blumenbildung neu zu bildenden Blättern mit zunehmendem Alter der Pflanze ab, da zunehmende Blattmassen zu einem erweiterten C- zu N-Verhältnis führten.

Bei den Wachstumsbeobachtungen wurde der erste Tag der Blatt- bzw. Blumenentwicklung festgehalten, wenn am Vegetationspunkt visuell sichtbar war, ob sich ein Blatt oder eine Blume entwickelte. Das Modell berechnete dabei nicht den Zeitpunkt der beginnenden Blumenentwicklung oder die Induktion der Blüten, sondern es fand ein stetiger aber in seiner Intensität gesteuerter Massenfluss an pflanzeigenem Substrat für die Blumenentwicklung statt. Diesen Massenfluss steuerte eine sigmoide Umschaltfunktion unter Berücksichtigung eines Grenzwertes, bei dessen Überschreitung das generative Wachstum verstärkt gefördert wurde, und einer Zustands-

variablen, dem Blattflächenzuwachs, die sich diesem Grenzwert näherte. Ein Parameter der Funktion begrenzte dabei den Anteil an Blumenzuwachs am Gesamtzuwachs des Sprosses, um ein ausschließlich generatives Wachstum im Modell bei der remontierenden Gerbera zu verhindern.

Die Intensität des Substratflusses zur Bildung von Blüten war im Modell abhängig vom Spross- zu Wurzelmassenverhältnis und vom C- zu N-Substrat-Verhältnis, da beide die Partitionierung zwischen Spross und Wurzel bestimmten, sowie von der Anzahl an neugebildeten Blättern bzw. deren Assimilationsfläche.

Die Blattbildung und -entwicklung wurde über mathematische Gleichungssysteme erfasst, die auf den durchgeführten Beobachtungen der Neubildung von Blättern in Abhängigkeit von Umweltparametern beruhten. Die Modellierung mittels dieser Gleichungen unter Berücksichtigung der Einstrahlungssummen und des Blattflächenindex erwies sich als ausreichend zur Simulation der Blattentwicklung.

Mit dem Absterben von Blättern erfolgte eine Einbeziehung und Wiederverwendung abbaubarer Pflanzeninhaltsstoffe aufgrund von Ergebnissen von C- und N-Gehaltsbestimmungen an lebenden und abgestorbenen Blättern. Die partiellen Blattflächenindices entsprechend der Blattalterskategorien übten rückkoppelnd einen Einfluss auf die Brutto-CO₂-Austauschrate des Bestandes aus und schlossen somit den interaktiven Kreislauf des Gerberamodells.

6.4 Behandlung der Problematik in der Literatur

Die Einflussnahme verschiedener Faktoren in einem Simulationsmodell auf das vegetative und generative Wachstums einer Kultur konnte nach HAMMER (1998) nur durch eine Kombination mathematischer Gleichungssysteme mit multivariaten Simulationsmodellen dargestellt werden. Die Differentialgleichungen in solchen Modellen sollen sich dabei auf physiologische und biochemische Prozesse orientieren, um das dynamische Verhalten der Pflanze auf sich verändernde Umweltbedingungen möglichst realistisch wiedergeben zu können (MARSHALL und BISCOE, 1980 a).

Zur Gewinnung von Wachstumsdaten wurden bislang Untersuchungen in Klimakammern durchgeführt, um die Reaktion von Pflanzen auf einzelne Umweltfaktoren analysieren zu können (CLEMENT et al., 1976; HEIßNER, 1997; FRICK et al., 1998). In dieser Arbeit war es das Ziel, die Untersuchungen unter praxisnahen Bedingungen durchzuführen. Die Funktionalität des Gerberamodells belegte, dass Klimakammeruntersuchungen nicht notwendig waren und dass aufgrund von Wachstumsbeobachtungen im Gewächshaus in Kombination mit Gaswechsellmessungen reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden konnten. Vergleichbare Erhebungen führte bereits LEFFRING (1981) durch, wobei nicht die Erstellung eines Simulationsmodells das Ziel war, sondern die statistische Auswertung der Abhängigkeit des Blümenertrages vom Wachstum und Aufbau der Pflanzen unter Berücksichtigung definierter Umweltbedingungen.

Die Photosynthese ist ein häufig in Modellen dargestellter Teilprozess der Pflanzenphysiologie. Das im Gerberamodell verwendete Gleichungssystem basierte auf einer Funktion nach JOHNSON und THORNLEY (1984). MARSHALL und BISCOE (1980 a) zeigten in einem Vergleich mit weiteren in der Literatur angegebenen Funktionen die Vorteile einer hyperbolischen Funktion hinsichtlich der Anpassung an experimentell ermittelte Daten auf. Dabei bezogen sie ihre Berechnungen auf die Netto-CO₂-Austauschrate, so dass diese Gleichung zur Auswertung der Gaswechsellmessungen und zur Berechnung der Photosyntheseparameter α , θ , P_{\max} und R_d herangezogen wurde.

Wie schon GLOVER (1974) und MARSHALL und BISCOE (1980 b) feststellten, wurde hier beobachtet, dass die Intensität des Gaswechsels vom Blattalter abhängt. Eine Gruppierung der Blätter in Alterskategorien war daher angebracht, bevor das Modell die Photosynthese- und Atmungsleistungen berechnete.

Eine vergleichbare Einteilung wählten JOHNSON und THORNLEY (1985) in ihrem Grasmodell, wobei neben jungen, sich entwickelnden sowie alternden, absterbenden Blättern das erste und zweite vollentwickelte Blatt unterschieden wurden. Das Grasmodell besaß dabei den Vorteil, dass sich in jeder Blattalterskategorie nur ein Blatt befand. Im Gerberamodell wurden dagegen mehrere Blätter in einer Kategorie zusammengefasst und mit deren Summen die Photosynthese- und Atmungsleistungen berechnet. Die Simulation der Entwicklung des Blattflächenindex stimmte mit den beobachteten Werten überein, so dass für die Qualität des Modells kein Nachteil der Verwendung von Summen und Mittelwerten aus den Blattalterskategorien entstand. Die Berechnung der partiellen Blattflächenindices in Abhängigkeit der Altersstruktur unterlag im Modell im Vergleich zu den Wachstumsbeobachtungen anderen Kriterien, so dass sich die vom Modell berechneten Daten von den beobachteten unterschieden.

Das Gesamt-Trockengewicht setzt sich nach THORNLEY (1972 a) aus Struktur- und Substrattrockengewicht zusammen. Das Struktur-trockengewicht umfasst dabei die Biomasse, die in Zellwänden und -organellen sowie organischen Endprodukten eingebunden ist, wogegen das Substrattrockengewicht alle die für die Biosynthese von Struktur-trockengewicht und zur Energiegewinnung notwendigen mineralischen und organischen Verbindungen enthält. Die Trennung von Struktur- und Substrattrockenmasse wurde in den Modellen von REYNOLDS und THORNLEY (1982) und JOHNSON und THORNLEY (1983) belegt und weiter ausgeführt.

Den Einfluss des Substratspeichers auf das Pflanzenwachstum beschrieb THORNLEY (1972 a) in Form einer Michaelis-Menten-Enzymreaktion in Abhängigkeit von vorhandenen Kohlenhydraten. In erweiterter Form ergab sich daraus eine Bi-Substrat-Enzymreaktionskinetik, die das Wachstum und damit den Einbau von Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen in neugebildete Strukturmasse in Abhängigkeit der C- und N-Substratkonzentration im Substratspeicher definierte. Eine Verallgemeinerung der Substratquellen für Modellierungszwecke als Kohlenhydrat und Nitrat als entsprechende C- und N-Quellen beeinflusst nach Angaben von JOHNSON und THORNLEY (1985) das Ergebnis eines Modells nur unwesentlich.

Die Verwendung von N-Substraten bzw. die Abhängigkeit des Wachstums von der N-Aufnahme und der N-Konzentration im Substratspeicher untersuchten CLEMENT et al. (1976). Sie beschrieben die Intensität der N-Aufnahme als Funktion der Wurzelaktivität und der vorausgegangenen Photosyntheseaktivität insbesondere der Bereitstellung von C-Substraten während der Photoperiode. Der Einfluss der C-Substratkonzentration wurde dadurch belegt, dass die höchste N-Aufnahmerate am Ende der Photoperiode im Nachlauf nach der höchsten Photosyntheseaktivität zu beobachten war. Dabei wiesen sie auf eine Rückkopplung zwischen Photosyntheseaktivität und Verfügbarkeit von N-Substrat hin, da letzteres im Mangel die Photosyntheseleistung limitierte. BRÜGGE (1985) bestätigte die Abhängigkeit des Zuwachses an Pflanzenstrukturmasse von den C- und N-Substratkonzentrationen.

JOHNSON und THORNLEY (1985) unterschieden hinsichtlich einer vom Alter abhängigen potentiellen Wurzelaktivität unterschiedliche Alterskategorien bei den Wurzeln. Mit zunehmendem Alter der Wurzeln wurde von einer abnehmenden potentiellen Wurzelaktivität ausgegangen. Dieses entsprach analog den Messergebnissen für die Photosyntheseaktivität unterschiedlich alter Blätter, konnte im Gerberamodell allerdings nicht eingesetzt werden, da Untersuchungen der Altersstruktur der Wur-

zeln und deren Wurzelaktivität in Abhängigkeit des Alters nicht Gegenstand der Arbeit waren und auch die Literatur dazu keine Informationen enthielt.

Im Gegensatz zu SHEEHY et al. (1996), welche den N-Verbrauch als primäre synthetische Aktivität der Pflanze beim Massenaufbau bezeichneten, fand im Gerberamodell zur Aufteilung der für Wachstumsvorgänge zur Verfügung stehenden Substrate eine interaktive Funktion unter Berücksichtigung des Spross- zu Wurzelmassen-Verhältnisses, der Spross- und Wurzelaktivität sowie der C- und N-Substratkonzentrationen Verwendung. Bei Einsatz der von THORNLEY und JOHNSON (1990) beschriebenen Funktion wurde für die Pflanze das Bestreben angenommen, ein funktionelles Gleichgewicht zwischen den Spross- und Wurzelaktivitäten unter Berücksichtigung der entsprechenden Trockenmassen nach DAVIDSON (1969) aufrechtzuerhalten. Daraus folgte, dass ein Mangel an C-Substrat eine Erhöhung des Spross- zu Wurzelmassen-Verhältnisses einleitete sowie ein N-Substrat-Mangel eine Erhöhung des Wurzelanteils zur Folge hatte.

THORNLEY (1972 b) versuchte, das Umschalten zwischen vegetativem und generativem Wachstum in einem Modell darzustellen. Dabei war das Wachstum vom Verhältnis vegetativer und generativer „Morphogene“ abhängig und deren Konzentration vom Vorhandensein entsprechender Enzyme zur Katalysierung der Bildung der „Morphogene“. Man ging davon aus, dass eine ansteigende Konzentration an vegetativem „Morphogen“ die Synthese des generativen Enzyms hemmte und umgekehrt. Nachteilig an dieser Modellstruktur war, dass es nicht an experimentelle Daten angepasst werden konnte und somit unrealistisch erschien.

Einen weiteren Ansatz zur Blütenbildung entwickelten COCKSHULL et al. (1979) und THORNLEY und COCKSHULL (1980), die die Blütenentwicklung von *Dendranthema x grandiflorum* Ramat. (früher: *Chrysanthemum morifolium* Ramat.) in Abhängigkeit von Größenveränderungen der Blatt- und Blütenanlagen mittels einer sigmoidalen Umschaltfunktion bzw. einer Exponentialfunktion vierten Grades mit zwei Minima berechneten.

Im Gerberamodell erfolgte auf der Basis der Wachstumsbeobachtungen die Aufteilung des Zuwachses auf Blätter und Blüten mit Hilfe einer Switch-Funktion. Die Intensität des Substratflusses zur Bildung von Blumen war dabei abhängig vom Spross- zu Wurzelmassenverhältnis, dem C- zu N-Substrat-Verhältnis und von der Anzahl an neugebildeten Blättern bzw. deren Assimilationsfläche.

Manuelles Blattbrechen an Gerberapflanzen gehört in der Praxis zu den Standardkulturmaßnahmen während des Sommerhalbjahres (BRAUNSMANN, 1998). In der gärtnerischen Praxis wird die Meinung vertreten, dass nach dem Blattbrechen gesteigertes Wachstum und eine geringere Blütenabortion zu beobachten ist. Im Modell wurde die Möglichkeit eingerichtet, über eine Ereignisabfrage einen Verlust an Blattmasse zu einem beliebigen Zeitpunkt während des Durchlaufes zu initiieren. Der Einfluss auf das weitere Wachstum sollte mit Hilfe des Modells prognostiziert werden.

Nach MONTEITH (1965) erreicht die belichtete photosynthetisch aktive Blattfläche im Pflanzenbestand ab Blattflächenindices von 5 bis 6 m² m⁻² ein Maximum, das durch eine weitere Zunahme an Blattmasse nicht gesteigert werden kann. In der simulierten Kultur stagnierte zum Zeitpunkt vor dem Blattbrechen unter den äußeren Bedingungen des Beobachtungszeitraumes der Zuwachs an Blattfläche. Die Wurzelmasse zeigte eine abnehmende Tendenz an. Mit steigendem Blattflächenindex sank gleichzeitig die Lichtdurchdringung im Bestand. In der Folge verringerte sich die photosynthetische Aktivität des Bestandes bezogen auf den Blattflächenindex.

Ein unter abnehmender natürlicher Lichtintensität zunehmendes C-Substratdefizit in der Pflanze führte zu einer Förderung des Sprosswachstums, wobei der Spross-

zuwachs unter den Umweltbedingungen im Winter gerade noch ausreichte, die absterbende Blattmasse durch neue zu ersetzen und den Blattflächenindex aufrecht zu erhalten. Hinzu kam, dass die Pflanze vermehrt Energie für den Erhalt der vorhandenen Blattmasse aufbringen musste. Die Förderung des Sprosswachstums zu Ungunsten des Aufbaus an Wurzelmasse führte im Modell zu einer Reduktion der Wurzel, da absterbendes Material nicht mehr ausreichend ersetzt werden konnte.

Die Modelldurchläufe mit Blattbrechvorgängen unterschiedlicher Intensität zeigten im Vergleich zur Kontrolle ohne Entfernung von Blättern eine Zunahme des Blatt- und Wurzelwachstums in der Zeit nach der Maßnahme. Die Zunahme war größer, wenn die Entblätterung im Modell nach 200 Tagen Ende Dezember stattfand als schon nach 150 Tagen Mitte November.

Beim Blattbrechen wurden hauptsächlich alternde, absterbende Blätter entfernt und der Blattflächenindex verringert. Mehr Licht konnte in der Folge den Bestand durchdringen und tiefer liegende Blätter mit mehr Licht versorgen. Junge heranwachsende Blätter im Zentrum der Pflanze könnten aufgrund der besseren Lichtdurchdringung ein höheres photosynthetisches Leistungspotential entwickelt haben (SHEEHY et al., 1980). Durch das Ausbrechen alternder, absterbender Blätter wurde die Leistungsfähigkeit der verbleibenden Blätter bezogen auf den Blattflächenindex insgesamt erhöht. Zudem wiesen jüngere Blätter im Vergleich zu älteren bei gleicher Einstrahlung höhere apparente Netto-CO₂-Austauschraten auf, so dass davon ausgegangen werden konnte, dass sie photosynthetisch aktiver waren und das vorhandene Licht besser ausnutzten.

Eine Kombination der besseren Lichtdurchdringung des Bestandes, der höheren photosynthetischen Leistungsfähigkeit sich entwickelnder Blätter und des Bestandes bezogen auf den Blattflächenindex könnten die Ursache für die vom Modell berechnete Zunahme der Zuwachsraten der Blätter und Wurzeln gewesen sein. LEFFRING (1981) stellte in ihren Untersuchungen keine Wachstum fördernden Effekte durch das Blattbrechen fest. Nicht umstritten war der Vorteil der besseren Licht- und Luftdurchdringung des Bestandes, die nach OSTENK (1981) eine vorbeugende phytosanitäre Wirkung gegen *Botrytis cinerea* bedingt, der auf absterbenden Blättern unter Klimabedingungen eines dichten Pflanzenstandes gute Voraussetzungen für seine Verbreitung findet und gesunde Blätter und Blumen infizieren kann.

Die Wurzel profitierte ebenfalls von der erhöhten C-Substrat-Verfügbarkeit, da mit abnehmendem C-Substrat-Defizit wieder mehr Wurzelmasse gebildet werden konnte. Die Annahmen und Ergebnisse des Gerberamodells bestätigten Beobachtungen in der Praxis, dass das Blattbrechen das Pflanzenwachstum fördert (BRAUNSMANN, 1998).

Die Optimierung der Klimaparameter ergab für die Heiztemperatureinstellung Sollwerte von 18 °C tags und 15 °C nachts. Diesem Ergebnis stehen Aussagen von VAN OS et al. (1989) gegenüber, die bei Temperatursollwerten von 21 °C tags und 14 °C nachts eine Zunahme an Blumen geringerer Qualität und vermehrte Blütenknospenabortionen feststellten, wodurch sich letztendlich geringere Erträge an Blumen erster Qualität gegenüber Temperatureinstellungen von 18 °C tags und nachts sowie 14 °C tags und 21 °C nachts ergaben.

Eine maximale optimale Einstrahlungsintensität von 160 W m⁻² PAR entsprach im Gewächshaus einer Beleuchtungsstärke um die 30 klux. Dieses Ergebnis stand im Widerspruch zu Aussagen von BOWE et al. (1969) und PENNINGSFELD und FORCHTHAMMER (1980), die für die Gerbera ein sehr hohes Lichtbedürfnis angaben, so dass sich sogar eine volle sommerliche Einstrahlungsintensität im Freiland fördernd auf den Ertrag auswirkte. Eine Ursache für die abweichende Empfehlung für die Sorte 'Moana' könnte auf eine Eigenschaft der Sorte zurückgeführt werden,

bereits bei niedrigeren Einstrahlungsintensitäten die maximale photosynthetische Leistung zu erreichen (Abb. 27). Schließlich ist es ein wichtiges Ziel der Gerberazüchtung, die Blümenerträge während der lichtarmen Jahreszeit zu fördern, wenn die Preise aufgrund des geringeren Angebotes am höchsten sind (PENNINGSFELD und FORCHTHAMMER, 1980). Hohe Wintererträge könnten aus der Eigenschaft resultieren, schon bei geringeren Einstrahlungsintensitäten eine möglichst hohe photosynthetische Leistung zu erzielen. Eine Schattierung wäre folglich in den Sommermonaten bei voller Sonneneinstrahlung ratsam. Zudem kann die Temperaturerhöhung im Sommer im Gewächshaus nur durch eine Schattierung begrenzt werden. Gleichzeitig wird eine höhere relative Luftfeuchtigkeit im Gewächshaus gehalten und das Wasserdampfsättigungsdefizit verringert, um die Stomata der Gerbera für den Gaswechsel geöffnet zu halten. Ein ungehinderter Gaswechsel stellt die Voraussetzung dar, den für Wachstumsvorgänge benötigten Kohlenstoff zu assimilieren und den Wasser- und Nährstofftransport in der Pflanze aufrechtzuerhalten. Die Qualität der Blumen sowie die Anzahl an Blütenabortionen konnte durch das Gerberamodell nicht wiedergegeben werden. Dazu wären gesonderte Untersuchungen notwendig gewesen. Im Modell wuchsen die Blumen jedoch immer dann weiter, wenn genügend C- und N-Substrate für die Wachstumsvorgänge zur Verfügung standen. Im Anschluss an diese Arbeit müssen weitere Kulturversuche durchgeführt werden, um die berechneten optimalen Klimaparameter hinsichtlich der Einflüsse auf Ertrag und Qualität zu überprüfen.

6.5 Wissenschaftliche Bewertung der Ergebnisse

Erstmalig konnte für eine Gerbera-Hydrokultur am Beispiel der Sorte 'Moana' ein Wachstumsmodell erstellt werden, in dem ausgehend von Atmung, CO₂- und Stickstoffaufnahme das Wachstum von Blättern, Blumen und Wurzeln simuliert wurde. Die äußeren Einflussgrößen wirkten sich dabei direkt auf Gaswechsel und Stickstoffaufnahme aus und beeinflussten die Verfügbarkeit von pflanzeigenen Substraten, d. h. Assimilaten und Nährstoffen, für Wachstum und Energiegewinnung. Das Wachstum der Pflanzenorgane war somit abhängig vom Vorhandensein notwendiger C- und N-Substrate.

Die Modellierung des Wechsels zwischen überwiegend vegetativem oder generativem Wachstum wurde speziell für die Gerbera entwickelt und stellte die Abhängigkeit der Blumenbildung vom Spross- zu Wurzelmassen- und C- zu N-Substratverhältnis sowie der neugebildeten Anzahl an Blättern bzw. deren Assimilationsfläche erstmals dar. Da in wissenschaftlichen wie auch in praxisnahen Untersuchungen an der Gerberakultur der Blümenertrag das bedeutenste Prüfmerkmal ist, stellt das Modell eine Basis dar, mit den gewonnenen Erkenntnissen Kulturverfahren zu entwickeln, bei denen die Optimierung der genannten Verhältnisgrößen zur Maximierung des Blümenertrages im Mittelpunkt steht. Das Modell leistet dabei einen Beitrag zur Prognose des Blatt- und Blümenwachstums.

In gartenbaulichen Forschungsanstalten kann mit Hilfe des Modells bei der Vorbereitung von Versuchsvorhaben die Wahl einzustellender Klima- und Kulturparameter unter Berücksichtigung äußerer Einflussgrößen erleichtert werden, da sinnvolle Einstellungen und Grenzwerte in der Computersimulation identifiziert werden können.

Mit dem Gerberamodell wurde die notwendige Grundlage geschaffen, um in weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen ein weiterführendes Modell für die Gerbera-Hydrokultur zu entwickeln. Dieses Modell sollte dann in der Lage sein, sortenübergreifend neben dem quantitativen Wachstum auch die Qualität der Blumen und das betriebswirtschaftliche Ergebnis der Kultur zu prognostizieren und zu optimieren.

6.6 Abgeleitete praktische Empfehlungen

Mit dem Modell ist es möglich, grundsätzliche Wachstumsvorgänge zu simulieren und dem Praktiker die Auswirkungen von Kulturparametern und -maßnahmen nahezubringen. Die Untersuchungen wurden bewusst in praxisnah ausgestatteten Gewächshäusern des Gartenbauzentrums Westfalen-Lippe durchgeführt, um den Bezug zur gärtnerischen Praxis belegen zu können. Das Modell erfüllt seine Aufgabe als Hilfsmittel für die Optimierung spezifischer Kulturparameter zur Erzielung bestmöglicher Ertragsleistungen unter Berücksichtigung des Standorteinflusses.

Die optimierten Kulturparameter können nicht uneingeschränkt auf alle Gerberasorten übertragen werden. Aufgrund der genetischen Vielfalt des Gerberasortimentes und dem Wissen, dass die Sorten in Bezug auf die Kulturbedingungen unterschiedliche Ansprüche haben und unterschiedlich reagieren, muss die praktische Nutzung des Modells auf die untersuchte Sorte 'Moana' eingeschränkt werden. Des Weiteren wurde im Modell hinsichtlich der Pflanzenernährung nur Stickstoff als limitierendes Nährelement einbezogen. Daher sollte es nur in Kulturen eingesetzt werden, in denen alle anderen Nährstoffe ausreichend zur Verfügung stehen. Bei einer Weiterentwicklung des Modells könnten unterschiedliche Sorteneigenschaften und weitere Nährstoffe Berücksichtigung finden.

Dennoch konnten mit den Empfehlungen, gespreizte Temperaturen zwischen Tag und Nacht einzustellen, Assimilationsbelichtung in Verbindung mit CO₂-Düngung auf 15 Stunden und 600 bis 700 ppm CO₂ zu begrenzen, die relative Luftfeuchtigkeit über 60 % zu halten, kontinuierliche Blattbrechvorgänge bei ausreichendem Lichtangebot durchzuführen und eine Schattierung des Bestandes zu berücksichtigen, wertvolle Ratschläge für die Praxis erarbeitet werden. In Kombination mit in weiteren Untersuchungen zu erstellenden Teilmodellen für eine Qualitätsbestimmung der geernteten Gerbera und eine betriebswirtschaftliche Analyse könnte ein umfassendes Modell entstehen, um den betriebswirtschaftlichen Erfolg der Gerberakultur zu prognostizieren.

6.7 Vorschläge für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen

Im Gerberamodell offenbarten sich Ungenauigkeiten bei der Steuerung der Massenflüsse zwischen den Blattalterskategorien. Obwohl der Gesamtblattflächenindex der Gerbera im Modell im Vergleich zu den tatsächlich ermittelten Werten gut nachgebildet werden konnte, wurden bei den partiellen Blattflächenindices Abweichungen festgestellt. In diesem Bereich erwies sich das Modell als nicht ausreichend stabil. Die Gründe könnten in den unterschiedlichen Einteilungskriterien des Modells und der Wachstumsbeobachtungen in die Blattalterskategorien sowie in der Abstimmung zwischen der Berechnung von Mittelwerten und Summen innerhalb der Blattalterskategorien und den Zu- und Abflüssen aus den Statusvariablen liegen. In weiteren Untersuchungen sollten zusätzliche Daten gewonnen werden, um die Blattbildung und deren -entwicklung realistischer steuern zu können. Durch die gute Wiedergabe des Gesamtblattflächenindices erwies sich die übergeordnete Modellstruktur dennoch als geeignet, den Blattzuwachs bzw. die Blattmasse des Bestandes zu simulieren.

Bei der Simulation des Pflanzenwachstums mit den Kulturdaten des Bewässerungsprüfgliedes mit Tensiometersteuerung traten hinsichtlich des Blattflächenindex BFI Abweichungen zu den beobachteten Daten auf. BFI wurde zumeist überschätzt, was auf ein höheres spezifisches Blattflächentrockengewicht bei den Pflanzen dieses Prüfgliedes hinwies. In den drei Bewässerungsprüfgliedern wurden unterschiedliche Salzgehalte in den Mattennährlösungen gemessen. Diese hatten nach

LARCHER (1994) über die osmotische Wirkung der im Wasser gelösten Salze einen Einfluss auf die Wasserverfügbarkeit für die Pflanze. Höhere Salzgehalte, wobei die osmotische Wasserbindung mit der Höhe der Salzkonzentration linear ansteigt, hemmen die Wasseraufnahme und führen zu einem höheren Trockensubstanzanteil. Aufgrund der Salzgehalte wäre zu begründen, dass das spezifische Blattflächentrockengewicht der Tensiomat gesteuerten Bewässerungsvariante höher lag.

In weiteren Untersuchungen zur Auswirkung unterschiedlicher Salzgehalte in der Mattenlösung auf die Wasser- und Nährstoffaufnahme und das Wachstum der Gerbera einschließlich der Trockenmassenanteile sollten zusätzliche Informationen erarbeitet werden. Diese Daten könnten in der Folge im Modell mathematisch eingebunden werden, um den Einfluss des Salzgehaltes in Verbindung mit der tatsächlichen Wasserverfügbarkeit wiederzugeben. Bislang wirkten sich die N-Konzentration der Mattenlösung im Modell auf die N-Aufnahme und der Wassergehalt in der Matte indirekt auf die Öffnung der Stomata aus. Eine Interaktion dieser Umweltfaktoren unter Berücksichtigung der Wasserverfügbarkeit und deren Auswirkung auf die Wachstumsvorgänge sollte zu modellieren sein.

Physiologische Prozesse waren zum Teil im Modell nicht oder nur in Form mathematischer Gleichungen realisiert. So wurde der Anteil an Strukturmasse am Gesamtrockengewicht mit dem Parameter $f_{WG} = 0,828$ als konstant angenommen, um die Stabilität des Modells zu gewährleisten, da dieser sich bei dynamischer Darstellung innerhalb des Modells als instabil erwiesen hatte und zum Teil Werte annahm, die physiologisch unrealistisch gewesen wären.

Der Einfluss von Phytohormonen, die das Wachstum jeder Pflanze steuern, konnte nicht einbezogen werden, da die notwendigen Daten und Hypothesen nicht verfügbar waren. Neuere Untersuchungen am Gartenbauzentrum Westfalen-Lippe zeigten, dass eine differenzierte Steuerung der Wurzelraumtemperatur im Hydrokultursystem Einfluss auf Wurzelatmung, Energiefreisetzung, Bildung von Phytohormonen und damit auf den Ertrag der Gerbera nehmen kann (RICHTER und MATSCHKE, 2000).

Bei den Berechnungen der CO_2 -Austauschrate wurde die Photorespiration nicht berücksichtigt, da nicht genügend Daten zur Verfügung standen. Ansätze zur Modellierung der Photosynthese einschließlich des Einflusses der Photorespiration wurden von ACOCK et al. (1976) in Form eines Simulationsmodells und von HAHN (1987) auf biochemischer Basis entwickelt. Eine Umsetzung im Gerberamodell war nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich. Der Einfluss der Photorespiration auf die apparente Netto- CO_2 -Austauschrate ging in den Dunkelatemungsparameter R_d indirekt in Gleichung (5) mit ein.

Eine Berücksichtigung dieser Effekte im Modell nach Klärung der Mechanismen wäre durchaus denkbar. Des weiteren könnte ein Untermodell, das den Wasserhaushalt der Pflanzen einschließlich des Einflusses aus der Interaktion zwischen Salzgehalt und Wasserverfügbarkeit in der Matte berücksichtigt, das Gerberamodell ergänzen. Für die Praxis wären Module zur Bestimmung der Verkaufsqualität der Gerberablumen und zur Einbeziehung betriebswirtschaftlicher Daten sinnvoll, um die Auswirkungen der Kulturführung am monetären Ertrag messen zu können.

Es sollte bedacht werden, dass das Sortenspektrum bei der Gerbera weit gefasst ist, so dass die berechneten Werte vorerst nur für die Sorte 'Moana' Gültigkeit besaßen. Überprüfungen an anderen Sorten müssten durchgeführt werden. Die genetische Variabilität der Gerbera, die immer wieder anhand uneinheitlicher Reaktionen auf äußere Einflussgrößen festgestellt wurde, ließ erwarten, dass das Modell mit den berechneten Parametern keine Sorten übergreifende Gültigkeit besaß (FISCHER et al., 1994; ESCHER et al., 1996; RICHTER, 1998). Da eine Übertragbarkeit auf ande-

re Sorten zu diesem Zeitpunkt nicht möglich war, gilt dieses erst recht für die Verwendung des Modells in Bezug auf andere Schnittblumenarten. Über Sensitivitätsanalysen könnten die Modellparameter herausgefunden werden, die den größten Einfluss bei der Anpassung des Modells an die Eigenschaften anderer Sorten aufweisen. Eine Berücksichtigung in den Funktionen des Modells wären dann möglich, um das Modell sortenübergreifend einsetzen zu können. Dazu müssten weitere Kulturversuche mit verschiedenen Sorten durchgeführt werden, um die notwendigen Prüfmerkmale zu untersuchen.

Die Verwendung des Gerberamodells für Forschungszwecke ist sinnvoll, wie die Untersuchung zur Auswirkung des Blattbrechens zeigte. Nach weiteren Überprüfungen des Modells können bestimmte Fragen hinsichtlich der Klimaführung oder definierter Kulturmaßnahmen auf dem Computer simuliert werden, um umfangreiche Kulturversuche zu vereinfachen und Versuchsfaktoren genauer festlegen zu können. Das Modell stellt dabei kein statisches Berechnungsschema dar. Es sollte dynamisch weiterentwickelt werden, um der Realität immer besser zu entsprechen.

Eine Modifikation des Modells kann zu vielfältigen Anwendungen führen. Der Einbau des Modells in ein Kultursteuerprogramm, das dem Kultivateur vorgibt, in welchem Zustand sich die Kultur befindet bzw. in der nahen Zukunft befinden wird und welche Klimaparameter unter den gegebenen Umweltbedingungen die besten wären, ist denkbar und könnte unter Umständen sogar die Steuerung und Überwachung des Gewächshausklimas übernehmen. Das Simulationsmodell würde unter gegebenen nicht beeinflussbaren Umweltbedingungen wie die Einstrahlungsintensität die optimalen Kulturparameter für die steuerbaren Einflussgrößen wie Temperatur, CO₂-Konzentration, N- und Wasserversorgung sowie künstliche Belichtung berechnen und über eine zu schaffende Schnittstelle Stellglieder der Gewächshausregelung ansteuern können. Für die Funktion als Klimaregelprogramm wäre eine Kombination mit einem Simulationsmodell zur kurzfristigen Klimaentwicklung im Gewächshaus notwendig. Modelle dieser Art wurden bereits entwickelt. HEISSNER (1996) entwarf eines zur Kurzfriststeuerung der Temperatur, Luftfeuchte und CO₂-Konzentration im Gewächshaus, wobei das Modell auf den Bilanzen des Wasserdampfes sowie des CO₂ beruhte.

Das Gerberamodell stellt damit den notwendigen ersten Schritt für eine Reihe weiterer Untersuchungen dar, mit Hilfe einer umfassenden Kultursimulation eine neuartige zielgerichtete Klimaregel- und Kulturführungsstrategie zu entwickeln. Das Ziel dieser Strategie sollte auf die Optimierung von Ertrag, Qualität und betriebswirtschaftlichen Erfolg ausgerichtet sein.

7 Zusammenfassung

Ein Simulationsmodell für die Schnittblumen-Steinwollkultur der *Gerbera jamesonii* (H. Bolus ex Hook.) wurde am Beispiel der Sorte 'Moana' erstellt. Aufbauend auf Messdaten morphologischer und physiologischer Parameter an Versuchspflanzen ließ sich das Wachstum von Blättern, Wurzeln und Blumen modellieren. Auf der Basis der Auswirkungen äußerer Einflussgrößen konnte mit dem Modell die Entwicklung eines Gerberabestandes unter Berücksichtigung des Wachstums der Blätter, Blumen und Wurzeln einschließlich der wichtigsten Ertragskomponente, dem kumulativen Blumenertrag, in Abhängigkeit von der Kohlendioxid- und Stickstoffaufnahme simuliert werden.

- Mit dem computergestützten Simulationsmodell für vegetative und generative Wachstumsvorgänge in einem Gerberabestand werden Prognosen von Wachstum und Blumenertrag unter Berücksichtigung klimatischer und kulturtechnischer Einflussgrößen möglich. Auf der Basis physiologischer Leistungskriterien wie Atmung, Kohlendioxid- und Stickstoffaufnahme stehen dem Anwender Zustandsgrößen für das Wachstum der Blätter, Wurzeln und Blumen unter Berücksichtigung der Alterung sowie äußerer Einflussgrößen (Temperatur, Einstrahlung, rel. Luftfeuchtigkeit, Tageslänge, Wasser- und N-Angebot) bei ganzheitlicher Betrachtung des Bestandes zur Verfügung.
- Die Auswertungen des zeitlichen und räumlichen Wachstums der Gerbera der Sorte 'Moana' zeigten, dass die Blattverteilung unter Berücksichtigung des Alters Einfluss auf die Photosyntheseleistung des Bestandes nahm. Ebenso wurde eine Abhängigkeit der Blumenentwicklung von der Blattbildung nachgewiesen. Diese Ergebnisse waren die Basis für die Entwicklung der Modellstruktur.
- Teile von in der Literatur beschriebenen Modellen konnten erfolgreich in eine übergeordnete Modellstruktur eingebunden werden. Für den Wechsel zwischen vegetativem und generativem Wachstum unter Berücksichtigung der Blattalterung wurden für die Gerbera spezifische Modellfunktionen entwickelt. Bislang nicht verfügbare Gleichungssysteme zur Definition des Einflusses der Umweltparameter auf die Kohlendioxid- und Stickstoffaufnahme waren das Ergebnis der Gaswechsel- und Stickstoffaufnahmeanalysen.
- Die mit dem Modell berechneten Wachstumswerte für die Blattentwicklung und den Blumenertrag stimmten bei Verwendung gleicher Umweltbedingungen mit denen der Gewächshaukultur überein. Des weiteren erwies sich das Modell für die Analyse der Auswirkungen eines simulierten Blattbrechvorgangs mit seinen Prognosen als geeignet.
- Die Verwendung des Modells zur Bestimmung optimaler Klima- und Wachstumsparameter für die Kultur der Sorte 'Moana' führte zu Werten, die bei konstanter Einhaltung eine 60 prozentige Ertragssteigerung gegenüber anfänglich eingesetzten Parametern bedingten. Die maximale Einstrahlungsintensität für optimale Blumenerträge von 160 W m^{-2} PAR (entspricht ca. 30 klux Beleuchtungsstärke im Gewächshaus) wies darauf hin, im Gegensatz zu Aussagen in der Literatur über die Lichtbedürftigkeit der Gerbera, in einer Kultur der Sorte 'Moana' Schattieranlagen entsprechend einzusetzen.
- Für den Anbauer und die Beratung stellt das Modell ein Hilfsmittel dar, in einer Gerberakultur mit der Sorte 'Moana' die Sollwerte der Klimaführung bei gegebener

nen nicht beeinflussbaren Kulturbedingungen zu optimieren, um größtmögliche Erträge zu erzielen. Dem Versuchsansteller in Forschungseinrichtungen wird damit ein Rüstzeug gegeben, klima- und kulturtechnische Einflussgrößen und deren Kombinationen vorab mit dem Modell zu überprüfen, Extremwerte zu identifizieren und somit sinnvolle Versuchsparameter in Abhängigkeit des Versuchszieles zu definieren.

- Mit dem Simulationsmodell wurde eine Grundlage für die Entwicklung neuer Klimaregelstrategien geschaffen, die in Verbindung mit einem Klimaregelcomputer die Kulturführung unter Berücksichtigung des zu erwartenden Pflanzenwachstums steuern können. Weitere Modellmodule, die die Qualität des Produktes oder den betriebswirtschaftlichen Erfolg der Kultur prognostizieren, wären sinnvolle Ergänzungen.
- Die Innovation der vorgenommenen Simulation für die Gerbera ergibt sich aus der Entwicklung eines umfassenden Kulturmodells, welches basierend auf morphologischen und physiologischen Leistungsparametern das vegetative und generative Wachstum eines Pflanzenbestandes berechnet. Daraus leiten sich Anwendungen für die Praxis wie auch für Forschungseinrichtungen ab. Die Wahl einzustellender Klima- und Kulturparameter unter Berücksichtigung äußerer Einflussgrößen zur Optimierung von Wachstum und Blumenertrag steht dabei im Vordergrund.

8 Literaturverzeichnis

- ACOCK, B., D. A. CHARLES-EDWARDS, D. J. FITTER, D. W. HAND, L. J. LUDWIG, J. WARREN WILSON und A. C. WITHERS 1978: The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis: An experimental examination of two canopy models, *Journal of Experimental Botany* **111**, 29, 815-827
- ACOCK, B., D. A. CHARLES-EDWARDS und D. W. HAND 1976: An analysis of some effects of humidity on photosynthesis by a tomato canopy under winter light conditions and a range of carbon dioxide concentrations, *Journal of Experimental Botany* **100**, 27, 933-941
- ACOCK, B., D. A. CHARLES-EDWARDS und S. SAWYER 1979: Growth response of a Chrysanthemum crop to the environment. III. Effects of radiation and temperature on dry matter partitioning and photosynthesis, *Annals of Botany* **44**, 289-300
- AIKMAN, D. P. und A. SCAIFE 1993: Modelling plant growth under varying environmental conditions in a uniform canopy, *Annals of Botany* **72**, 485-492
- ANON. 1996: Tragbares Photosynthesesystem HCM-1000, Walz Mess- und Regeltechnik, Heinz Walz GmbH, Effeltrich
- BARNES, A. und C. C. HOLE 1978: A theoretical basis of growth and maintenance respiration, *Annals of Botany* **42**, 1217-1221
- BLANKE, M. 1995: Wieviel CO₂ veratmet eine Erdbeerwurzel?, *Erwerbsgartenbau* **37**, 2, 46-48
- BOWE, R., W. DÄNHARDT, W. FRITZSCHE, W. GERSTNER und W. JUNGES 1969: *Gerbera*, Verlag J. Neumann-Neudamm, Melsungen, Berlin, Basel, Wien
- BRAUNSMANN, J. 1998: Kulturtechnische Hinweise, in: *Gerbera-Seminar-Broschüre vom 21. und 22.01.1998*, Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe - Referat Gartenbau, Münster, 45-63
- BREEZE, V. und J. ELSTON 1983: Examination of a model and data describing the effect of temperature on the respiration rate of crop plants, *Annals of Botany* **51**, 611-616
- BRUGGE, R. 1985: A mechanistic model of grass root growth and development dependent upon photosynthesis and nitrogen uptake, *Journal of theoretical Biology* **116**, 443-467
- BRUGGE, R. und J. H. M. THORNLEY 1985: A growth model of root mass and vertical distribution, dependent on carbon substrate from photosynthesis and with non-limiting soil conditions, *Annals of Botany* **55**, 563-577
- CHARLES-EDWARDS, D. A., K. E. COCKSHULL, J. A. HORRIDGE und J. H. M. THORNLEY 1979: A model for flowering in Chrysanthemum, *Annals of Botany* **44**, 557-566
- CHARLES-EDWARDS, D. A. und L. J. LUDWIG 1974: A model for leaf photosyn-

- thesis by C3 plant species, *Annals of Botany* **38**, 921-930
- CLEMENT, C. R., M. J. HOPPER, L. H. P. JONES und E. L. LEAFE 1976: Uptake of nitrate by *Lolium perenne* from flowing nutrient solution, *Journal of Experimental Botany* **40**, 1139-1152
- COCKSHULL, K. E. 1979: Effects of irradiance and temperature on flowering of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. in continuous light, *Annals of Botany* **44**, 541-560
- COOPER, A. J. und J. H. M. THORNLEY 1976: Response of dry matter partitioning, growth, and carbon and nitrogen levels in the tomato plant to changes in root temperature: experiment and theory, *Annals of Botany* **40**, 1139-1152
- DAVIDSON, R. L. 1969: Effect of root/leaf temperature differentials on root/shoot ratios in some pasture grasses and clover, *Annals of Botany* **33**, 561-569
- EHLERINGER, J. und O. BJÖRKMAN 1977: Quantum yields for CO₂ uptake in C3 and C4 plants, *Plant Physiology* **59**, 86-90
- ESCHER, F., H.-G. GUDEHUS, L. MAYR, W. MENZINGER, P. REHRMANN und H. THOMALE 1996: Schnittblumenkulturen, 5. Aufl., Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- FARRAR, J. F. und M. L. WILLIAMS 1991: The effects of increased atmospheric carbon dioxide and temperature on carbon partitioning, source-sink relations and respiration, *Plant, Cell and Environment* **14**, 819-830
- FARQUHAR, G. D., S. VON CAEMMERER und J. A. BERRY 1980: A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species, *Planta* **149**, 78-90
- FISCHER, P., S. AMBERGER-OCHSENBAUER und E. MEINKEN 1994: Geschlossenes System bei *Gerbera* - Düngung in Trogbeeten, *Deutscher Gartenbau* **48**, 790-795
- FRICK, J., C. PRECETTI und C. A. MITCHELL 1998: Predicting lettuce canopy photosynthesis with statistical and neural network models, *Journal of the American Society for Horticultural Science* **123**, 1076-1080
- FUNNEL, K. A., E. W. HEWETT, I. J. WARRINGTON und J. A. PLUMMER 1998: Leaf mass partitioning as a determinant of dry matter accumulation in *Zantedeschia*, *Journal of the American Society for Horticultural Science* **123**, 973-979
- GLOVER, J. 1974: The rate of apparent photosynthesis of whole sugarcane plants, *Annals of Botany* **38**, 909-920
- GOUDRIAAN, J. und J. L. MONTEITH 1990: A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion, *Annals of Botany* **66**, 695-701
- HAHN, B. D. 1987: A mathematical model of photosynthesis and photorespiration, *Annals of Botany* **60**, 157-169
- HAMMER, G. L. 1998: Crop modelling: current status and opportunities to advance, in: MARCELIS, L. F. M. (Ed.) 1998: Proceedings of the second international

Symposium on models for plant growth, environmental control and farm management in protected cultivation, *Acta Horticulturae* **456**, 27-36

- HEISSNER, A. 1996: Ein einfaches Gewächshausklimamodell für die Kurzfriststeuerung von Temperatur, Luftfeuchte und CO₂-Konzentration, *Gartenbauwissenschaft* **61**, 289-300
- HEISSNER, A. 1997: Der CO₂-Gaswechsel von Paprikapflanzen in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke, der CO₂-Konzentration, der Lufttemperatur und dem Dampfdrucksättigungsdefizit der Luft: Messungen und Modell, *Gartenbauwissenschaft* **62**, 78-90
- HILPERT, D. W., A. LARIGAUDERIE und J. F. REYNOLDS 1991: The influence of carbon dioxide and daily photon-flux density on optimal leaf nitrogen concentration and root:shoot ratio, *Annals of Botany* **68**, 365-376
- HOPPER, D. A. und P. A. HAMMER 1991: Regression models describing *Rosa hybrida* response to day/night temperature and photosynthetic photon flux, *Journal of the American Society for Horticultural Science* **116**, 609-617
- HOPPER, D. A., P. A. HAMMER und J. R. WILSON 1994: A simulation model of *Rosa hybrida* growth response to constant irradiance and day and night temperatures, *Journal of the American Society for Horticultural Science* **119**, 903-914
- HOPPER, D. A., P. A. HAMMER und J. R. WILSON 1996: Comparison of two simulation-based methods for modeling plant growth, *HortScience* **31**, 1, 25-28
- JOHNSON, I. R. 1985: A model of the partitioning of growth between the shoots and roots of vegetative plants, *Annals of Botany* **52**, 421-431
- JOHNSON, I. R., T. E. AMEZIANE und J. H. M. THORNLEY 1983: A model of grass growth, *Annals of Botany* **51**, 599-609
- JOHNSON, I. R. und A. J. PARSONS 1985: A theoretical analysis of grass growth under grazing, *Journal of theoretical Biology* **112**, 345-367
- JOHNSON, I. R. und J. H. M. THORNLEY 1983: Vegetative crop growth model incorporating leaf area expansion and senescence, and applied to grass, *Plant, Cell and Environment* **6**, 721-729
- JOHNSON, I. R. und J. H. M. THORNLEY 1984: A model of instantaneous and daily canopy photosynthesis, *Journal of theoretical Biology* **104**, 531-545
- JOHNSON, I. R. und J. H. M. THORNLEY 1985: Dynamic model of the response of a vegetative grass crop to light, temperature and nitrogen, *Plant, Cell and Environment* **8**, 485-499
- JOHNSON, I. R. und J. H. M. THORNLEY 1987: A model of shoot:root partitioning with optimal growth, *Annals of Botany* **60**, 133-142
- JONES, H. G. 1992: Plants and microclimate - A quantitative approach to environmental plant physiology, 2. Aufl., University Press, Cambridge
- KU, S. B. und EDWARDS, G. E. 1978: Oxygen inhibition of photosynthesis. III. Temperature dependence of quantum yield and its relation to O₂/CO₂ solubility ratio, *Planta* **140**, 1-6

- LARCHER, W. 1994: Ökophysiologie der Pflanzen, 5. Aufl., Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- LEFFRING, L. 1981: De bloempoduktie van Gerbera, Proefschrift,, Landbouwhogeschool te Wageningen, Pudoc, Wageningen
- MÄKELÄ, A. A. und R. P. SIEVÄNEN 1987: Comparison of two shoot-root partitioning models with respect to substrate utilization and functional balance, *Annals of Botany* **59**, 129-140
- MARSHALL, B. und P. V. BISCOE 1980 a: A model for C3 leaves describing the dependence of net photosynthesis on irradiance - I. Derivation, *Journal of Experimental Botany* **120**, 31, 29-39
- MARSHALL, B. und P. V. BISCOE 1980 b: A model for C3 leaves describing the dependence of net photosynthesis on irradiance - II. Application to the analysis of flag leaf photosynthesis, *Journal of Experimental Botany* **120**, 31, 41-48
- MATSCHKE, J. und M. RICHTER 1998: Wie lassen sich Vitalitäts- und Qualitätseinbußen bei der Gerbera (*Gerbera jamesonii*) derzeit erfassen, in: Gerbera-Seminar-Broschüre vom 21. und 22.01.1998, Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe - Referat Gartenbau, Münster, 69-89
- MONTEITH, J. L. 1965: Light distribution and photosynthesis in field crops, *Annals of Botany* **29**, 17-37
- OSTENK, R. 1981: Botrytis in Gerbera geen probleem voor telers die rekenen, *Vakblad voor de Bloemisterij* **36**, 39, 104-105
- PENNINGSFELD, F. und L. Forchthammer 1980: Gerbera, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- PRIOUL, J. L. und P. CHARTIER 1977: Partitioning of transfer und carboxylation components of intracellular resistance to photosynthetic CO₂ fixation: a critical analysis of the methods used, *Annals of Botany* **41**, 789-800
- REYNOLDS, J. F. und J. H. M. THORNLEY 1982: A shoot:root partitioning model, *Annals of Botany* **49**, 585-597
- RICHTER, M. 1998: Assimilationsbelichtung bei Gerbera, in: Gerbera-Seminar-Broschüre vom 21. und 22.01.1998, Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe - Referat Gartenbau, Münster, 39-44
- RICHTER, M. und J. MATSCHKE 2000: Bessere Wurzelatmung auf warmer Matte, *Das Taspo Magazin* **1**, 2, 11-12
- RICHTER, O., U. SPICKERMANN und F. LENZ 1991: A new model for plant growth *Gartenbauwissenschaft* **56**, 99-106
- SCHACHT, H. und M. SCHENK 1995: Steuerung der Düngung von Gewächshausgurken (*Cucumis sativus* L.) in geschlossenen Nährlösungssystemen mit Hilfe eines Simulationsmodells, *Gartenbauwissenschaft* **60**, 77-85
- SCHACHT, H. und M. SCHENK 1997: Validation of a simulation model to control fertilisation of greenhouse cucumber in soilless culture, *Gartenbauwissenschaft* **62**, 145-151
- SHEEHY, J. E., J. M. COBBY und G. J. A. RYLE 1980: The use of a model to inves-

- investigate the influence of some environmental factors on the growth of perennial ryegrass, *Annals of Botany* **46**, 343-365
- SHEEHY, J. E., F. GASTAL, P. L. MITCHELL, J.-L. DURAND, G. LEMAIRE und F. I. WOODWARD 1996: A nitrogen-led model of grass growth, *Annals of Botany* **77**, 165-177
- STEINBACHER, J., F. WALZ und W. HORN 1993: Ein Modell für das Längenwachstum von Topfchrysanthemen, *Gartenbauwissenschaft* **58**, 149-153
- THORNLEY, J. H. M. 1969: A model to describe the partitioning of photosynthate during vegetative plant growth, *Annals of Botany* **33**, 419-430
- THORNLEY, J. H. M. 1970: Respiration, growth and maintenance in plants, *Nature* **227**, 304-305
- THORNLEY, J. H. M. 1972 a: A balanced quantitative model for root:shoot ratios in vegetative plants, *Annals of Botany* **36**, 431-441
- THORNLEY, J. H. M. 1972 b: A model of a biochemical switch, and its application to flower initiation, *Annals of Botany* **36**, 861-871
- THORNLEY, J. H. M. 1974: Light fluctuations and photosynthesis, *Annals of Botany* **38**, 363-373
- THORNLEY, J. H. M. 1976: *Mathematical models in plant physiology*, Academic Press, London
- THORNLEY, J. H. M. und K. E. COCKSHULL 1980: A catastrophe model for the switch from vegetative to reproductive growth in the shoot apex, *Annals of Botany* **46**, 333-341
- THORNLEY, J. H. M. und I. R. JOHNSON 1990: *Plant and crop modelling - A mathematical approach to plant and crop physiology*, Clarendon Press, Oxford
- VDLUFA 1991: Bestimmung wasserlöslicher Kohlenhydrate, *Methodenbuch Band III*, **7.3.1**, 1-2
- VAN OS, P. C., R. DE KOSTER und A. A. M. VAN DER WURFF 1989 a: Dag/nachttemperatuur van invloed op produktie en kwaliteit Gerbera, *Vakblad voor de Bloemisterij* **44**, 7, 56-57
- VAN OS, P. C., R. DE KOSTER und A. A. M. VAN DER WURFF 1989 b: Bloemknopabortie bij Gerbera te beïnvloeden via temperatuur, *Vakblad voor de Bloemisterij* **44**, 7, 58-59
- VON WILLERT, D. J., R. MATYSSEK und W. HERPPICH 1995: *Experimentelle Pflanzenökologie*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York

- WALKER, A. 1997: ModelMaker - User Manual Version 3, Cherwell Scientific Publishing Limited, Oxford
- WERKER, A. R. und K. W. JAGGARD 1997: Modelling asymmetrical growth curves that rise and then fall: Applications to foliage dynamics of sugar beet (*Beta vulgaris* L.), *Annals of Botany* **79**, 657-665
- WIEBE, H.-J. 1995: Validierung und Anwendung eines Simulationsmodells für die Blütenbildung von Kohlrabi in Abhängigkeit von Vernalisation und Devernalisation, *Gartenbauwissenschaft* **60**, 97-101
- WOLEDGE, J und W. D. DENNIS 1982: The effect of temperature on photosynthesis of ryegrass and white clover leaves, *Annals of Botany* **50**, 25-35

Anhang A - Liste der wichtigsten Messwerte des HCM-1000

Tab. 7: Liste der wichtigsten Messwerte, die bei einer Messdatenerfassung des HCM-1000 innerhalb eines Datensatzes abgespeichert wurden (verändert nach ANON., 1996).

Date (dd-nnn-yy)	Datumsangabe in der Form Tag-Monat-Jahr
Time (hh:mm:ss)	Zeitangabe in der Form Stunden:Minuten:Sekunden
MO_ST (----)	Angabe des Messmodus und des Merkmals, ob der obere Deckel offen oder geschlossen ist
Obj (---)	Angabe des Messmodus und des Merkmals, ob der obere Deckel offen oder geschlossen ist
Leaf (cm ² oder mg)	Bezugsgröße des eingespannten Objektes; die Art der Bezugsgröße, Fläche oder Gewicht, kann festgelegt werden
H ₂ O_MP (ppm)	H ₂ O-Differenzmesswert, gemessen mit dem BINOS-100/4PS während eines Messpunktes
H ₂ O_ZP (ppm)	H ₂ O-Differenzmesswert, gemessen mit dem BINOS-100/4PS während eines Nullpunktes
CO ₂ _MP (ppm)	H ₂ O-Differenzmesswert, gemessen mit dem BINOS-100/4PS während eines Nullpunktes
CO ₂ _ZP (ppm)	CO ₂ -Differenzmesswert, gemessen mit dem BINOS-100/4PS während eines Nullpunktes
CO ₂ _abs (ppm)	CO ₂ -Absolutwert, gemessen mit dem BINOS-100/4PS während einer CO ₂ -Absolutmessung
Tcuv (°C)	Temperatur in der Messküvette
Text (°C)	Umgebungstemperatur bei der Messküvette
Tleaf (°C)	Temperatur des in der Messküvette eingespannten Objektes
RH (%)	relative Luftfeuchtigkeit am Ausgang der Messküvette
PAR_MQS (μmol m ⁻² s ⁻¹)	auf das Blatt auftreffende photosynthetisch aktive Strahlung, die mit dem Miniquantensensor erfasst wird, der sich außer halb der Messküvette befindet; ist bei MO_ST das Merkmal geschlossener Deckel eingetragen ist, so werden die Messwerte des Miniquantensensors mit 0,92 multipliziert, bevor sie abgespeichert werden
PAR_LU (μmol m ⁻² s ⁻¹)	auf die Blattebene auftreffende Strahlung bei Verwendung des Beleuchtungsaufsatzes 1050-H
Flow (ml min ⁻¹)	Durchsatz am Messküvetteneingang
Press (hPa)	barometrischer Luftdruck
Tr (mmol m ⁻² s ⁻¹) oder (μmol g ⁻¹ s ⁻¹)	berechneter Wert für die Transpirationsrate; je nach Art der Bezugsgröße, Fläche oder Gewicht, ändert sich die Einheit und die Berechnung der Transpirationsrate
ALVPD (Pa kPa ⁻¹)	berechneter Wert für das Luft zu Blatt Wasserdampfsättigungsdefizit ALVPD
cond_H ₂ O (mmol m ⁻² s ⁻¹) oder (μmol g ⁻¹ s ⁻¹)	berechneter Wert für die H ₂ O-Leitfähigkeit; je nach Art der Bezugsgröße, Fläche oder Gewicht, ändert sich die Einheit und die Berechnung der H ₂ O-Leitfähigkeit
NP (μmol m ⁻² s ⁻¹) oder (nmol g ⁻¹ s ⁻¹)	berechneter Wert für die apparente Netto-CO ₂ -Austauschrate; je nach Art der Bezugsgröße, Fläche oder Gewicht, ändert sich die Einheit und die Berechnung der Austauschrate

Anhang B - Umrechnung physikalischer Einheiten

1. Einstrahlung:

$$\text{W m}^{-2} \text{ PAR} \Leftrightarrow \mu\text{mol Photonen PAR m}^{-2} \text{ s}^{-1} / 4,6 \text{ (LARCHER, 1994)}$$

2. CO₂-Austauschrate:

$$\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} = \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} * 4,401\text{E-}08 \text{ kg } \mu\text{mol}^{-1}$$

3. Transpirationsrate und Wasserdampfleitfähigkeit:

$$\text{kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1} = \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1} * 1,80\text{E-}05 \text{ kg mmol}^{-1}$$

4. CO₂-Konzentration der Luft bei konstantem Druck:

$$\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-3} = \frac{\text{ppm CO}_2 * 0,04401 \text{ kg mol}^{-1} * 273,15 \text{ K}}{0,02241 \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1} * \text{Temperatur K} * 1000000}$$
$$\text{ppm CO}_2 = \frac{\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-3} * 0,02241 \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1} * \text{Temperatur K} * 1000000}{0,04401 \text{ kg mol}^{-1} * 273,15 \text{ K}}$$

5. N-Konzentration in der Mattennährlösung:

$$\text{kg N l}^{-1} = \text{kg NO}_3 \text{ l}^{-1} * 0,014 \text{ kg N mol}^{-1} / 0,062 \text{ kg NO}_3 \text{ mol}^{-1}$$

Anhang C - Verzeichnis aller Modellvariablen und -parameter

α_N	- C-Verbrauch bei der Atmung für die Stickstoffaufnahme [kg C kg ⁻¹ N] = 0,5
Alter_B1	- mittleres Blattalter sich entwickelnder Blätter [d] = 22 (Startwert)
Alter_B2	- mittleres Blattalter vollentwickelter Blätter [d] = 0 (Startwert)
Alter_B3	- mittleres Blattalter alternder, absterbender Blätter [d] = 0 (Startwert)
ALVPD	- Luft zu Blatt Wasserdampfdefizit [Pa kPa ⁻¹] = $p_{ALVPD1} * r_{LF} * Temp^2 + p_{ALVPD2} * Temp^2 + p_{ALVPD3} * r_{LF} * Temp + p_{ALVPD4} * Temp + p_{ALVPD5} * r_{LF} + p_{ALVPD}$
A_{max}	- Entwicklungsdauer eines Blattes vom Erscheinen bis zur Vollentwicklung [d] = 30 wenn $\{round(p_{Amax1} * (GLisu/42)^2 + p_{Amax2} * GLisu/42 * p_{Amax3}) < 30\}$ Standard = $round(p_{Amax1} * (GLisu/42)^2 + p_{Amax2} * GLisu/42 + p_{Amax3})$
A_{maxalt}	- Wert von A _{max} vom Vortag [d] = 44 (Startwert)
Anzahl_B1	- Anzahl sich entwickelnder Blätter = 48,5 (Startwert)
Anzahl_B2	- Anzahl vollentwickelter Blätter = 0 (Startwert)
Anzahl_B3	- Anzahl alternder, absterbender Blätter = 0 (Startwert)
B1	- Strukturmasse sich entwickelnder Blätter [kg m ⁻²] $dB1/dt = +F10 - F2$ (Startwert=0,02226)
B2	- Strukturmasse vollentwickelter Blätter [kg m ⁻²] $dB2/dt = -F3 - F8 + F2$ (Startwert=0)
B3	- Strukturmasse alternder, absterbender Blätter [kg m ⁻²] $dB3/dt = +F3 - F12$ (Startwert=0)
BFI	- Blattflächenindex des Bestandes [m ² Blattfläche m ⁻² Boden] = $L1 + L2 + L3$
Blattzuwachs	- Summenvariable bei der Partitionierung des Sprosszuwachses auf Blätter oder Blumen [m ² Blattfläche] = 0 (Startwert)
Blumen	- Strukturmasse vorhandener Blumen [kg m ⁻²] $dblumen/dt = +F15 - F19$ (Startwert=0)
Blumenzahl	- Summenvariable bei der Partitionierung des Sprosszuwachses auf Blätter oder Blumen [Stück] = 0 (Startwert)
Bm	- maximale Blumenzahl pro Triebsegment [Stück m ⁻²] = 13,4
Bmax[0..365]	- Blattfläche bei Vollentwicklung eines Blattes [m ²] = 0,00989691 (Startwert)
Bmax0	- Startwert für die Blattfläche bei Vollentwicklung eines Blattes [m ²] = 0,0197938

BMw	- mittlere Blattfläche [m ²] = 0,02 (Startwert)
BZ	- Ereignismodul zur Berechnung von Variablen Blattzuwachs=Blattzuwachs+(F10/f _{tg}) Blumenzahl=Blumenzahl+F19/((p _{bz1} *Lisu ^{p_{bz2}})*f _{wg}) Blumenzahl=0 wenn (Blumenzahl>=Bm) Blattzuwachs=0 wenn (Blumenzahl>=Bm)
C	- C-Substrat-Konzentration [kg C kg ⁻¹ Strukturtrockengewicht] = W _C /W _g
cH₂O	- Wasserdampfleitfähigkeit [kg H ₂ O m ⁻² s ⁻¹] = 0,00147033*EXP(0,0608688*Temp)*EXP(-0,0935799*ALVPD)
CO₂	- CO ₂ -Konzentration der Luft [kg m ⁻³] = CO2kg
CR	- Rückführung von C aus absterbenden Blättern [kg C m ⁻²] = (F12+F8)*f _C *0,068
Ernte	- kumulierter Blumenenertrag [Stück m ⁻²] dErnte/dt=F19/((p _{bz1} *Lisu ^{p_{bz2}})*f _{wg}) (Startwert=0)
Ernte1	- Hilfsvariable für 'Ernte' = Ernte/100
F1	- Massenfluss von L2 nach L4 [kg Strukturmasse m ⁻²] = 0 wenn (p _{tot1} +p _{tot2} *BFI+p _{tot3} /Lisu<0) = (p _{tot1} +p _{tot2} *BFI+p _{tot3} /Lisu)*Stw)*BMw wenn (L3<=mb und BFI>1,5) = 0 Standard
F2	- Massenfluss von B1 nach B2 [kg Strukturmasse m ⁻²] = p _{γ8} *B _{max0} *f _{tg} *f _{wg} wenn (t=0) = (p _{γ7} *t+p _{γ8})*B _{max} [t-1]*f _{tg} *f _{wg} wenn (t<A _{max} and A _{maxalt} =A _{max}) = (p _{γ7} *t+p _{γ8})+(p _{γ7} *(t-1)+p _{γ8}))*B _{max} [t-1]*f _{tg} *f _{wg} wenn (t<A _{max} and A _{maxalt} >A _{max}) = 0 wenn (t<A _{max} and A _{maxalt} <A _{max}) = γ[t-A _{max}]*B _{max} [t-1]*f _{tg} *f _{wg} wenn (t=A _{max} and A _{maxalt} =A _{max}) = ((p _{γ7} *(t-1)+p _{γ8})+ γ[t-A _{max}])*B _{max} [t-1]*f _{tg} *f _{wg} wenn (t=A _{max} and A _{maxalt} >A _{max}) = γ[t-A _{max}]*B _{max} [t-1]*f _{tg} *f _{wg} wenn (t>A _{max} and A _{maxalt} =A _{max}) = (γ[t-A _{max}]+ γ[t-A _{max} -1])*B _{max} [t-1]*f _{tg} *f _{wg} wenn (t>A _{max} and A _{maxalt} >A _{max}) = 0 Standard
F3	- Massenfluss von B2 nach B3 [kg Strukturmasse m ⁻²] = γ[t-100]*B _{max} [t-100+vx]*f _{tg} *f _{wg} wenn (t>=100) = (p _{γ7} *(t-100+vx)+p _{γ8})*B _{max} [t-100+vx]*f _{tg} *f _{wg} wenn (t>=100-vx) = 0 Standard
F4	- Massenfluss von L1 nach L2 [m ² Blattfläche m ⁻²] = p _{γ8} *B _{max0} wenn (t=0) = (p _{γ7} *t+p _{γ8})*B _{max} [t-1] wenn (t<A _{max} and A _{maxalt} =A _{max}) = (p _{γ7} *t+p _{γ8})+(p _{γ7} *(t-1)+p _{γ8}))*B _{max} [t-1] wenn (t<A _{max} and A _{maxalt} >A _{max}) = 0 wenn (t<A _{max} and A _{maxalt} <A _{max}) = γ[t-A _{max}]*B _{max} [t-1] wenn (t=A _{max} and A _{maxalt} =A _{max}) = ((p _{γ7} *(t-1)+p _{γ8})+ γ[t-A _{max}])*B _{max} [t-1] wenn (t=A _{max} and A _{maxalt} >A _{max}) = γ[t-A _{max}]*B _{max} [t-1] wenn (t>A _{max} and A _{maxalt} =A _{max})

	$= (\gamma[t-A_{\max}] + \gamma[t-A_{\max}-1]) \cdot B_{\max}[t-1]$	wenn $(t > A_{\max} \text{ and } A_{\maxalt} > A_{\max})$
	$= 0$	Standard
F5	- Massenfluss von L2 nach L3 [m ² Blattfläche m ⁻²]	
	$= \gamma[t-100] \cdot B_{\max}[t-100+vx]$	wenn $(t \geq 100)$
	$= (p_{\gamma7} \cdot (t-100+vx) + p_{\gamma8}) \cdot B_{\max}[t-100+vx]$	wenn $(t \geq 100-vx)$
	$= 0$	Standard
F6	- Massenfluss von W _C nach R _{msp} [kg C m ⁻²]	
	$= ((3,2107E-08-9,7277E-11 \cdot \text{Alter_B1})$	wenn $(\text{Alter_B2}=0)$
	$\cdot L1 \cdot 12/44 \cdot 86400) \cdot W_C / (K_{rm} + W_C)$	
	$= (((3,2107E-08-9,7277E-11$	wenn $(\text{Alter_B3}=0)$
	$\cdot \text{Alter_B1}) \cdot L1 + (3,2107E-08$	
	$- 9,7277E-11 \cdot \text{Alter_B2}) \cdot L2) \cdot 12/44$	
	$\cdot 86400) \cdot W_C / (K_{rm} + W_C)$	
	$= (((3,2107E-08-9,7277E-11$	Standard
	$\cdot \text{Alter_B1}) \cdot L1 + (3,3107E-08$	
	$- 9,7277E-11 \cdot \text{Alter_B2}) \cdot L2$	
	$+ (3,2107E-08-9,7277E-11$	
	$\cdot \text{Alter_B3}) \cdot L3) \cdot 12/44 \cdot 86400)$	
	$\cdot W_C / (K_{rm} + W_C)$	
F7	- Massenfluss von W _C nach R _{wu} [kg C m ⁻²]	
	$= (\alpha_N \cdot U_N + (p_{rw1} + p_{rw2} \cdot \text{Temp24}) \cdot W_r) \cdot 12/44$	
F8	- Massenfluss von B2 nach B4 [kg Strukturmasse m ⁻²]	
	$= 0$	wenn $((p_{\text{tot1}} + p_{\text{tot2}} \cdot \text{BFI} + p_{\text{tot3}} / \text{Lisu}) < 0)$
	$= ((p_{\text{tot1}} + p_{\text{tot2}} \cdot \text{BFI} + p_{\text{tot3}} / \text{Lisu}) \cdot \text{Stw}) \cdot \text{BMw}$	wenn $(L3 \leq mb \text{ und } \text{BFI} > 1,5)$
	$\cdot f_{tg} \cdot f_{wg}$	
	$= 0$	Standard
F9	- Massenfluss von W _C nach R _{gsp} [kg C m ⁻²]	
	$= F14 \cdot (1-Y)/Y$	
F10	- Massenfluss von 'SpZuwachs' nach B1 [kg Strukturmasse m ⁻²]	
	$= (1-\text{Schalter}) \cdot \text{SpZuwachs}$	
F11	- Massenfluss von W _N nach 'SpZuwachs' [kg N m ⁻²]	
	$= P_P_{sh} \cdot f_N$	
F12	- Massenfluss von B3 nach B4 [kg Strukturmasse m ⁻²]	
	$= 0$	wenn $(L3 \leq mb)$
	$= 0$	wenn $((p_{\text{tot1}} + p_{\text{tot2}} \cdot \text{BFI} + p_{\text{tot3}} / \text{Lisu}) < 0)$
	$= ((p_{\text{tot1}} + p_{\text{tot2}} \cdot \text{BFI} + p_{\text{tot3}} / \text{Lisu}) \cdot \text{Stw}) \cdot \text{BMw}$	Standard
	$\cdot f_{tg} \cdot f_{wg}$	
F13	- Massenfluss von L3 nach L4 [m ² Blattfläche m ⁻²]	
	$= 0$	wenn $(L3 \leq mb)$
	$= 0$	wenn $((p_{\text{tot1}} + p_{\text{tot2}} \cdot \text{BFI} + p_{\text{tot3}} / \text{Lisu}) < 0)$
	$= ((p_{\text{tot1}} + p_{\text{tot2}} \cdot \text{BFI} + p_{\text{tot3}} / \text{Lisu}) \cdot \text{Stw}) \cdot \text{BMw}$	Standard
F14	- Massenfluss von W _C nach 'SpZuwachs' [kg C m ⁻²]	
	$= P_P_{sh} \cdot f_C$	
F15	- Massenfluss von 'SpZuwachs' nach 'Blumen' [kg Strukturmasse m ⁻²]	
	$= \text{Schalter} \cdot \text{SpZuwachs}$	
F16	- Massenfluss von W _C nach W _r [kg C m ⁻²]	
	$= P_P_r \cdot f_C$	

F17	- Massenfluss von W_N nach W_r [kg N m^{-2}] = $P_{-P_r} * f_N$
F18	- Massenfluss von W_r nach W_t [$\text{kg Strukturmasse m}^{-2}$] = $W_r * F13/BFI$
F19	- Massenfluss von 'Blumen' nach 'Ernte' [$\text{kg Strukturmasse m}^{-2}$] <div> <div> $= (p_{bz1} * Lisu^{pbz2}) * f_{wg} * 5$ $= (p_{bz1} * Lisu^{pbz2}) * f_{wg} * 4$ $= (p_{bz1} * Lisu^{pbz2}) * f_{wg} * 3$ $= (p_{bz1} * Lisu^{pbz2}) * f_{wg} * 2$ $= (p_{bz1} * Lisu^{pbz2}) * f_{wg}$ </div> <div> wenn wenn wenn wenn wenn </div> <div> $((Blumen \geq (p_{bz1} * Lisu^{pbz2}) * f_{wg} * 5))$ $((Blumen \geq (p_{bz1} * Lisu^{pbz2}) * f_{wg} * 4))$ $((Blumen \geq (p_{bz1} * Lisu^{pbz2}) * f_{wg} * 3))$ $((Blumen \geq (p_{bz1} * Lisu^{pbz2}) * f_{wg} * 2))$ $((Blumen \geq (p_{bz1} * Lisu^{pbz2}) * f_{wg}))$ </div> </div>
	= 0 Standard
f_C	- Kohlenstoffanteil der Strukturtrockenmasse [kg C kg^{-1} Struktur] = 0,4061
f_N	- Stickstoffanteil der Strukturtrockenmasse [kg N kg^{-1} Struktur] = 0,0237
f_r	- Anteil Wurzelstrukturmasse an der gesamten Strukturtrockenmasse [kg kg^{-1} Struktur] = W_r / W_g
f_{sh}	- Anteil Sprossstrukturmasse an der gesamten Strukturtrockenmasse [kg kg^{-1} Struktur] = W_{sh} / W_g
f_{tg}	- Spezifisches Blattflächentrockengewicht [kg m^{-2}] = 0,0562389 (s. e.: 0,00405119)
f_{wg}	- Anteil Strukturtrockenmasse an der gesamten Trockenmasse [kg kg^{-1}] = 0,828
$\gamma[0..365]$	- Bildungsrate neuer Blätter [m^{-1}] = 0 (Startwert)
GL	- Ereignismodul zur Berechnung von Variablen = $GLisu * 41/42 + PAR * h / 1000000$
GLisu	- Lichtsumme über 6 Wochen [MW s m^{-2} PAR] = 80 (Startwert)
Grenzwert	- Blattfläche, die entwickelt werden muss, bevor mehr Strukturzuwachs zugunsten der Blumenentwicklung verlagert wird [m^2 Blattfläche m^{-2}] <div> <div> $= 0,35$ $= 0,13$ $= 0,34$ $= 0,37$ $= 0,24$ </div> <div> wenn wenn wenn wenn Standard </div> <div> $(t \leq 90)$ $(t \leq 180)$ $(t \leq 270)$ $(t \leq 360)$ </div> </div>
h	- Tageslänge [s] = Photo

k_{att}	- Attenuationskoeffizient = 0,77 (s. e.: 0,021988)
K_C	- Koeffizient bei der Berechnung der Stickstoffaufnahme = 0,01
k_{gro}	- Wachstumsratenkoeffizient = 109,969 (s. e.: 8,92025)
Klima	- Klimadatentabelle
t	- Zeitvariable [d]
PARTag	- Tagesmittelwert der Einstrahlungsintensität photosynthetisch aktiver Strahlung [W m^{-2}]
PARV	- Variabilitätskoeffizient von PARTag
PTR	- Korrelationskoeffizient zwischen PARTag und TempTag
TempTag	- Temperaturmittelwert während der Lichtphase [$^{\circ}\text{C}$]
TempV	- Variabilitätskoeffizient von TempTag
TempN	- Temperaturmittelwert während der Nachtphase [$^{\circ}\text{C}$]
CO2kg	- Mittelwert der CO ₂ -Konzentration der Luft [$\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-3}$]
Photo	- Tageslänge [s]
relLF	- Mittelwert der relativen Luftfeuchtigkeit [%]
N-KonzV1	- Mittelwert der N-Konzentration in der Mattennährlösung der Variante mit Tensiomat gesteuerter Bewässerung [kg N l^{-1}]
N-KonzV2	- Mittelwert der N-Konzentration in der Mattennährlösung der Variante mit kontinuierlicher Überschussbewässerung [kg N l^{-1}]
N-KonzV3	- Mittelwert der N-Konzentration in der Mattennährlösung der Variante mit degressiv abnehmender Bewässerungsintensität [kg N l^{-1}]
N-Konz	- Mittelwert der N-Konzentration in der Mattennährlösung über alle Bewässerungsvarianten [kg N l^{-1}]
Tensio1	- Mittelwert der Saugspannung in den Steinwollmatten der Variante mit Tensiomat gesteuerter Bewässerung [hPa]
Tensio2	- Mittelwert der Saugspannung in den Steinwollmatten der Variante mit kontinuierlicher Überschussbewässerung [hPa]
Tensio3	- Mittelwert der Saugspannung in den Steinwollmatten der Variante mit degressiv abnehmender Bewässerungsintensität [hPa]
K_N	- Koeffizient bei der Berechnung der Stickstoffaufnahme = 0,005
K_{rm}	- Parameter zur Begrenzung der Kohlenstoffentnahme aus W _C = 0,00490845 (s. e.: 0,00031296)
L1	- partieller Blattflächenindex sich entwickelnder Blätter [$\text{m}^2 \text{ Blattfläche m}^{-2}$] $dL1/dt = -F4 + (1 - \text{Schalter}) * SpZuwachs / (f_{tg} * f_{wg})$ (Startwert=0,48)
L2	- partieller Blattflächenindex vollentwickelter Blätter [$\text{m}^2 \text{ Blattfläche m}^{-2}$] $dL2/dt = +F4 - F5 - F1$ (Startwert=0)
L3	- partieller Blattflächenindex alternder, absterbender Blätter [$\text{m}^2 \text{ Blattfläche m}^{-2}$] $dL3/dt = +F5 - F13$ (Startwert=0)
L4	- kumulierte Blattfläche abgestorbener Blätter [$\text{m}^2 \text{ Blattfläche m}^{-2}$] $dL4/dt = +F13 + F1$ (Startwert=0)
L12	- partieller Blattflächenindex sich entwickelnder und vollentwickelter Blätter [$\text{m}^2 \text{ Blattfläche m}^{-2}$]

	= L1+L2
Lisu	- Wochenlichtsumme [MW s m ⁻²] = 12 (Startwert)
m	- Transmissionskoeffizient = 0,0313 (s. e.: 0,0053)
mb	- Mindestblattfläche im partiellen Blattflächenindex L3 [m ² Blattfläche m ⁻²] = 0,07
N	- N-Substrat-Konzentration [kg N kg ⁻¹ Strukturtrockengewicht] = W _N /W _g
N_NL	- Stickstoffkonzentration in der Mattennährlösung [kg N l ⁻¹] = 2,5E-04 wenn (N-konz>2,5E-04) = N-konz Standard
NR	- Rückführung von N aus absterbenden Blättern [kg N m ⁻²] = (F12+F8)*f _N *0,555
p_{ALVPD}	- Regressionskoeffizienten zur Berechnung des ALVPD p _{ALVPD1} = -0,00104959 (s. e.: 0,000109305) p _{ALVPD2} = 0,0551821 (s. e.: 0,00673923) p _{ALVPD3} = 0,025694 (s. e.: 0,00386655) p _{ALVPD4} = -1,16597 (s. e.: 0,248973) p _{ALVPD5} = -0,285795 (s. e.: 0,0311495) p _{ALVPD6} = 22,0194 (s. e.: 2,004428)
p_{Amax}	- Regressionskoeffizienten zur Berechnung von A _{max} p _{Amax1} = -2,991 (s. e.: 3,117349) p _{Amax2} = 2,53 (s. e.: 12,200214) p _{Amax3} = 51,11 (s. e.: 10,058891)
PAR	- photosynthetisch aktive Strahlung [W m ⁻²] = PARTAG
PART	- Untermodell zur Berechnung der Aufteilung des Gesamtzuwachses auf Spross und Wurzeln
λ_r	- Aufteilungskoeffizient zugunsten der Wurzeln = 1/(1+P)
λ_{sh}	- Aufteilungskoeffizient zugunsten des Sprosses = P/(1+P)
P	- Aufteilungsfunktion = (P _f /P _{sh})*(P _N /(P _N +f _N))/(P _C /(P _C +f _C))
Pr	- Hilfstern = k _{gro} *P _C *P _N *λ _r *P _{W_r}
Psh	- Hilfstern = k _{gro} *P _C *P _N *λ _{sh} *P _{W_{sh}}
p_{bz1}	- Regressionskoeffizienten zur Berechnung des Blumentrockengewichtes p _{bz1} = 0,000808039 (s. e.: 2,5402E-05) p _{bz2} = 0,347595 (s. e.: 0,0212577)
p_{ch2O}	- Regressionskoeffizienten zur Berechnung der Wasserdampfleitfähigkeit p _{ch2O1} = 0,00147033 (s. e.: 0,000150201) p _{ch2O2} = 0,0608688 (s. e.: 0,0057367) p _{ch2O3} = -0,0935799 (s. e.: 0,00908694)
Pd1	- Untermodell zur Berechnung der Brutto-CO ₂ -Austauschrate sich entwickelnder Blätter pro Tag
fzX1	- Hilfsfunktion FZ(X1) = P _{m1} *(((1-2*θ)*X1_1+P _{m1})/√((X1_1+P _{m1}) ² -4*θ*P _{m1} *X1_1))

fzX0	$\frac{1}{(2 \cdot \theta \cdot k_{att})}$ - Hilfsfunktion FZ(XO) $= P_{m1} \cdot \left(\frac{((1-2 \cdot \theta) \cdot X0_1 + P_{m1})}{\sqrt{((X0_1 + P_{m1})^2 - 4 \cdot \theta \cdot P_{m1} \cdot X0_1)}} \right)$	
gt	$\frac{1}{(2 \cdot \theta \cdot k_{att})}$ - Hilfsfunktion g(T) $= (v_i - v_t \cdot (\text{Temp} / (\text{Temp} - T_0)))^2 + 2 \cdot v_i \cdot v_t \cdot (1 - p_{v_{i,t}}) \cdot (\text{Temp} / (\text{Temp} - T_0))$	
Pc1	- Untermodell zur Berechnung der aktuellen Brutto-CO ₂ -Austauschrate sich entwickelnder Blätter	
fX1	- Hilfsfunktion F(X1) $= \frac{\text{termX1} + P_m \cdot \ln((\text{termX1} + X1 + P_m \cdot (1 - 2 \cdot \theta)))}{(P_m \cdot (\text{termX1} + (1 - 2 \cdot \theta) \cdot X1 + P_m))}$ $- 2 \cdot \theta \cdot P_m \cdot \ln(2 \cdot (\text{termX1} + X1 + P_m \cdot (1 - 2 \cdot \theta)))$	
fX01	- Hilfsfunktion F(X0) $= \frac{\text{termX0} + P_m \cdot \ln((\text{termX0} + X0 + P_m \cdot (1 - 2 \cdot \theta)))}{(P_m \cdot (\text{termX0} + (1 - 2 \cdot \theta) \cdot X0 + P_m))}$ $- 2 \cdot \theta \cdot P_m \cdot \ln(2 \cdot (\text{termX0} + X0 + P_m \cdot (1 - 2 \cdot \theta)))$	
Pc	- aktuelle apparente Brutto-CO ₂ -Austauschrate sich entwickelnder Blätter des Bestandes $= (X0 - X1 - fX01 + fX1) / (2 \cdot \theta \cdot k_{att})$	
P_m	- Photosyntheseparameter (JOHNSON und THORNLEY, 1984) $= P_{max2} + \theta \cdot R_{d2}$	
Pn1	- Untermodell zur Berechnung der Photosyntheseparameter - Regressionskoeffizienten zur Berechnung der Photosyntheseparameter	
	a_{a1}	=1,98972-07 (s. e.: 9,9234E-07)
	a_{a2}	=1,36057 (s. e.: 6,63863)
	a_p	=-1,88717E-09 (s. e.: 1,23439E-10)
	a_r	=47,920116 (s. e.: 4,3679)
	c_{a1}	=5,07208E-06 (s. e.: 8,73319E-07)
	c_{a2}	=-0,00106894 (s. e.: 0,000232963)
	c_{p1}	=0,00102904 (s. e.: 4,2437E-05)
	c_{p2}	=-0,193403 (s. e.: 0,0107859)
	k_a	=-1,99554E-07 (s. e.: 9,92582E-07)
	k_p	=-3,35979E-07 (s. e.: 1,84544E-07)
	k_r	=1,19439E-08 (s. e.: 2,32616E-09)
	k_t	=4,06336 (s. e.: 0,549231)
	l_{p1}	=1,42242E-06 (s. e.: 7,624E-05)
	l_{p2}	=2,5381E-06 (s. e.: 6,39306E-06)
	l_{p3}	=-4,71574E-08 (s. e.: 1,32737E-07)
	l_{t1}	=-10,603553 (s. e.: 16,570905)
	l_{t2}	=0,593697 (s. e.: 0,38516)
	l_{t3}	=0,179346 (s. e.: 182,81981)
	n_{p1}	=0,000875722 (s. e.: 0,00104731)
	n_{p2}	=-4,04623 (s. e.: 7,86352)
	n_{p3}	=4558,8989 (s. e.: 17695,527)
	t_{a1}	=3,57693E-10 (s. e.: 9,13079E-11)
	t_{a2}	=-1,04764E-11 (s. e.: 2,22628E-12)
	t_{p1}	=1,82194E-08 (s. e.: 1,41016E-08)

t_{p2}	= -7,1138E-10	(s. e.: 2,91309E-10)
t_{t1}	= -0,30392	(s. e.: 0,057888)
t_{t2}	= 0,00582864	(s. e.: 0,0015847)
w_{p1}	= 2,60045E-08	(s. e.: 5,76705E-09)
w_{p2}	= -3,19849E-07	(s. e.: 9,62542E-08)
w_{t1}	= 0,0332244	(s. e.: 0,00325021)
w_{t2}	= -0,000700237	(s. e.: 7,7452E-05)
w_{t3}	= -0,367492	(s. e.: 0,0346445)
α	- Photosyntheseparameter, photosynthetische Effizienz $= k_a + a_{a1} \cdot \exp(a_{a2}/\text{Alter}^3) + t_{a1} \cdot \text{Temp} + t_{a2} \cdot \text{Temp}^2 + c_{a1} \cdot \text{CO}_2 + c_{a2} \cdot \text{CO}_2^2$	
P_{\max}	- Photosyntheseparameter, maximale Photosyntheseleistung $= k_p + a_p \cdot \text{Alter}^3 + t_{p1} \cdot \text{Temp} + t_{p2} \cdot \text{Temp}^2 + c_{p1} \cdot \text{CO}_2 + c_{p2} \cdot \text{CO}_2^2 + n_{p1} \cdot \text{N_NL} + n_{p2} \cdot \text{N_NL}^2 + n_{p3} \cdot \text{N_NL}^3 + l_{p1} \cdot \text{cH}_2\text{O} + l_{p2} \cdot \text{Temp} \cdot \text{cH}_2\text{O} + l_{p3} \cdot \text{Temp}^2 \cdot \text{cH}_2\text{O} + w_{p1} \cdot \text{ALVPD} + w_{p2} \cdot \text{ALVPD}/\text{Temp}$	
P_n	- apparente Netto-CO ₂ -Austauschrate eines Blattes [kg CO ₂ m ⁻²] $= ((P_{\max} + \alpha \cdot \text{PAR} - \theta \cdot R_d) - \sqrt{((P_{\max} + \alpha \cdot \text{PAR} - \theta \cdot R_d)^2 - 4 \cdot \theta \cdot (\alpha \cdot \text{PAR} \cdot (P_{\max} - (1 - \theta) \cdot R_d) - R_d \cdot P_{\max}))}) / (2 \cdot \theta)$	
R_d	- Dunkelatmung [kg CO ₂ m ⁻²] $= k_r \cdot \exp(a_r/\text{Alter}^3)$	
θ	- Photosyntheseparameter, Verhältnis des physikalischen Widerstands der CO ₂ -Diffusion zum Gesamtwiderstand $= k_t + (t_{t1} + l_{t1} \cdot \text{cH}_2\text{O} + w_{t1} \cdot \text{ALVPD}) \cdot \text{Temp} + (t_{t2} + l_{t2} \cdot \text{cH}_2\text{O} + w_{t2} \cdot \text{ALVPD}) \cdot \text{Temp}^2 + l_{t3} \cdot \text{cH}_2\text{O} + w_{t3} \cdot \text{ALVPD}$	
termX1	- Hilfsterm $= \sqrt{(X1^2 + 2 \cdot P_m \cdot (1 - 2 \cdot \theta) \cdot X1 + P_m^2)}$	
termX0	- Hilfsterm $= \sqrt{(X0^2 + 2 \cdot P_m \cdot (1 - 2 \cdot \theta) \cdot X0 + P_m^2)}$	
X1	- Hilfsfunktion $= X0 \cdot \exp(-k_{\text{att}} \cdot \text{LAI})$	
X0	- Hilfsfunktion $= (\alpha \cdot 2 \cdot k_{\text{att}} \cdot \text{PAR}) / (1 - m)$	
Pd	- apparente Tages-Brutto-CO ₂ -Austauschrate sich entwickelnder Blätter $= h \cdot P_{c_B1} - (h/2) \cdot (fzX1 - fzX0) \cdot gt$	
Pd2	- Untermodell zur Berechnung der Brutto-CO ₂ -Austauschrate vollentwickelter Blätter pro Tag	
Alter	- Kontrollvariable, ob Blätter dieser Blattalterskategorie vorhanden sind $= \text{Alter_B2}$	
fzX1	- Hilfsfunktion FZ(X1) $= 0$ wenn (Alter=0) $= P_{m1} \cdot (((1 - 2 \cdot \theta) \cdot X1_1 + P_{m1}) / \sqrt{((X1_1 + P_{m1})^2 - 4 \cdot \theta \cdot P_{m1} \cdot X1_1)}) / (2 \cdot \theta \cdot k_{\text{att}})$ Standard	

fzX0	- Hilfsfunktion FZ(XO) = 0 = $P_{m1} * (((1-2*\theta)*X0_1 + P_{m1}) / \sqrt{((X0_1 + P_{m1})^2 - 4*\theta*P_{m1}*X0_1)}) / (2*\theta*k_{att})$	wenn (Alter=0) Standard
gt	- Hilfsfunktion g(T) = 0 = $(v_i - v_t * (Temp / (Temp - T_0)))^2 + 2*v_i*v_t * (1 - p_{v_{ivt}}) * (Temp / (Temp - T_0))$	wenn (Alter=0) Standard
Pc2	- Untermodell zur Berechnung der aktuellen Brutto-CO ₂ -Austauschrate vollentwickelter Blätter	
Alter	- Kontrollvariable, ob Blätter dieser Blattalterskategorie vorhanden sind = Alter2	
fX1	- Hilfsfunktion F(X1) = 0 = $termX1 + P_m * \ln((termX1 + X1 + P_m * (1-2*\theta)) / (P_m * (termX1 + (1-2*\theta)*X1 + P_m))) - 2*\theta*P_m * \ln(2*(termX1 + X1 + P_m*(1-2*\theta)))$	wenn (Alter=0) Standard
fX02	- Hilfsfunktion F(X0) = 0 = $termX0 + P_m * \ln((termX0 + X0 + P_m * (1-2*\theta)) / (P_m * (termX0 + (1-2*\theta)*X0 + P_m))) - 2*\theta*P_m * \ln(2*(termX0 + X0 + P_m*(1-2*\theta)))$	wenn (Alter=0) Standard
PAR2	- auf die vollentwickelten Blätter einfallende photosynthetisch aktive Strahlung = $PAR * \exp(-k_{att} * (L1^{2/3}))$	
Pc	- aktuelle apparente Brutto-CO ₂ -Austauschrate vollentwickelter Blätter des Bestandes = 0 = $(X0 - X1 - fX02 + fX1) / (2*\theta*k_{att})$	wenn (Alter=0) Standard
P_m	- Photosyntheseparameter (JOHNSON und THORNLEY, 1984) = 0 = $P_{max2} + \theta * R_{d2}$	wenn (Alter=0) Standard
Pn2	- Untermodell zur Berechnung der Photosyntheseparameter	
α	- Photosyntheseparameter, photosynthetische Effizienz = 0 = $k_a + a_{a1} * \exp(a_{a2} / Alter3) + t_{a1} * Temp + t_{a2} * Temp^2 + c_{a1} * CO_2 + c_{a2} * CO_2^2$	wenn (Alter3=0) Standard
PAR2	- auf die vollentwickelten Blätter einfallende photosynthetisch aktive Strahlung = $PAR * \exp(-k_{att} * (L1^{2/3}))$	
P_{max}	- Photosyntheseparameter, maximale Photosyntheseleistung = 0	wenn (Alter3=0)

		$= k_p + a_p \cdot \text{Alter3} + t_{p1} \cdot \text{Temp} + t_{p2} \cdot \text{Temp}^2 + c_{p1} \cdot \text{CO}_2 + c_{p2} \cdot \text{CO}_2^2 + n_{p1} \cdot \text{N_NL} + n_{p2} \cdot \text{N_NL}^2 + n_{p3} \cdot \text{N_NL}^3 + l_{p1} \cdot \text{cH}_2\text{O} + l_{p2} \cdot \text{Temp} \cdot \text{cH}_2\text{O} + l_{p3} \cdot \text{Temp}^2 \cdot \text{cH}_2\text{O} + w_{p1} \cdot \text{ALVPD} + w_{p2} \cdot \text{ALVPD} / \text{Temp}$	Standard
	Pn	<p>- apparente Netto-CO₂-Austauschrate eines Blattes [kg CO₂ m⁻²]</p> $= 0 \quad \text{wenn } (\text{Alter3}=0)$ $= ((P_{\max} + \alpha \cdot \text{PAR2} - \theta \cdot R_d) - \sqrt{((P_{\max} + \alpha \cdot \text{PAR2} - \theta \cdot R_d)^2 - 4 \cdot \theta \cdot (\alpha \cdot \text{PAR2} \cdot (P_{\max} - (1 - \theta) \cdot R_d) - R_d \cdot P_{\max})))}) / (2 \cdot \theta)$	Standard
	R_d	<p>- Dunkelatmung [kg CO₂ m⁻²]</p> $= 0 \quad \text{wenn } (\text{Alter3}=0)$ $= k_r \cdot \exp(a_r / \text{Alter3})$	Standard
	termX1	<p>- Hilfstern</p> $= 0 \quad \text{wenn } (\text{Alter}=0)$ $= \sqrt{(X1^2 + 2 \cdot P_m \cdot (1 - 2 \cdot \theta) \cdot X1 + P_m^2)}$	Standard
	termX0	<p>- Hilfstern</p> $= 0 \quad \text{wenn } (\text{Alter}=0)$ $= \sqrt{(X0^2 + 2 \cdot P_m \cdot (1 - 2 \cdot \theta) \cdot X0 + P_m^2)}$	Standard
	X1	<p>- Hilfsfunktion</p> $= 0 \quad \text{wenn } (\text{Alter}=0)$ $= X0 \cdot \exp(-k_{\text{att}} \cdot \text{LAI})$	Standard
	X0	<p>- Hilfsfunktion</p> $= 0 \quad \text{wenn } (\text{Alter}=0)$ $= (\alpha \cdot 2 \cdot k_{\text{att}} \cdot \text{PAR2}) / (1 - m)$	Standard
	Pd	<p>- apparente Tages-Brutto-CO₂-Austauschrate sich entwickelnder Blätter</p> $= h \cdot \text{Pc_B2} - (h/2) \cdot (\text{fzX1} - \text{fzX0}) \cdot \text{gt}$	
Pd3		- Untermodell zur Berechnung der Brutto-CO ₂ -Austauschrate alternder, absterbender Blätter pro Tag	
	Alter	<p>- Kontrollvariable, ob Blätter dieser Blattalterskategorie vorhanden sind</p> $= \text{Alter_B3}$	
	fzX1	<p>- Hilfsfunktion FZ(X1)</p> $= 0 \quad \text{wenn } (\text{Alter}=0)$ $= P_{m1} \cdot (((1 - 2 \cdot \theta) \cdot X1_1 + P_{m1}) / \sqrt{((X1_1 + P_{m1})^2 - 4 \cdot \theta \cdot P_{m1} \cdot X1_1)}) / (2 \cdot \theta \cdot k_{\text{att}})$	Standard
	fzX0	<p>- Hilfsfunktion FZ(X0)</p> $= 0 \quad \text{wenn } (\text{Alter}=0)$ $= P_{m1} \cdot (((1 - 2 \cdot \theta) \cdot X0_1 + P_{m1}) / \sqrt{((X0_1 + P_{m1})^2 - 4 \cdot \theta \cdot P_{m1} \cdot X0_1)}) / (2 \cdot \theta \cdot k_{\text{att}})$	Standard
	gt	<p>- Hilfsfunktion g(T)</p> $= 0 \quad \text{wenn } (\text{Alter}=0)$ $= (v_i - v_t \cdot (\text{Temp} / (\text{Temp} - T_0)))^2 + 2 \cdot v_i \cdot v_t$	Standard

	$*(1-p_{v_{\text{vlt}}})*(\text{Temp}/(\text{Temp}-T_0))$	
Pc3	- Untermodell zur Berechnung der aktuellen Brutto-CO ₂ -Austauschrate alternder, absterbender Blätter	
Alter	- Kontrollvariable, ob Blätter dieser Blattalterskategorie vorhanden sind = Alter2	
fX1	- Hilfsfunktion F(X1) = 0 = $\text{termX1} + P_m * \ln((\text{termX1} + X1 + P_m * (1 - 2 * \theta)) / (P_m * (\text{termX1} + (1 - 2 * \theta) * X1 + P_m))) - 2 * \theta * P_m * \ln(2 * (\text{termX1} + X1 + P_m * (1 - 2 * \theta)))$	wenn (Alter=0) Standard
fX03	- Hilfsfunktion F(X0) = 0 = $\text{termX0} + P_m * \ln((\text{termX0} + X0 + P_m * (1 - 2 * \theta)) / (P_m * (\text{termX0} + (1 - 2 * \theta) * X0 + P_m))) - 2 * \theta * P_m * \ln(2 * (\text{termX0} + X0 + P_m * (1 - 2 * \theta)))$	wenn (Alter=0) Standard
PAR3	- auf die alternden, absterbenden Blätter einfallende photosynthetisch aktive Strahlung = $\text{PAR} * \exp(-k_{\text{att}} * L12)$	
Pc	- aktuelle apparente Brutto-CO ₂ -Austauschrate alternder, absterbender Blätter des Bestandes = 0 = $(X0 - X1 - fX03 + fX1) / (2 * \theta * k_{\text{att}})$	wenn (Alter=0) Standard
P_m	- Photosyntheseparameter (JOHNSON und THORNLEY, 1984) = 0 = $P_{\text{max}2} + \theta * R_{d2}$	wenn (Alter=0) Standard
Pn3	- Untermodell zur Berechnung der Photosyntheseparameter	
α	- Photosyntheseparameter, photosynthetische Effizienz = 0 = $k_a + a_{a1} * \exp(a_{a2} / \text{Alter3}) + t_{a1} * \text{Temp} + t_{a2} * \text{Temp}^2 + c_{a1} * \text{CO}_2 + c_{a2} * \text{CO}_2^2$	wenn (Alter3=0) Standard
PAR3	- auf die alternden und absterbenden Blätter einfallende photosynthetisch aktive Strahlung = $\text{PAR} * \exp(-k_{\text{att}} * L12)$	
P_{max}	- Photosyntheseparameter, maximale Photosyntheseleistung = 0 = $k_p + a_p * \text{Alter3} + t_{p1} * \text{Temp} + t_{p2} * \text{Temp}^2 + c_{p1} * \text{CO}_2 + c_{p2} * \text{CO}_2^2 + n_{p1} * N_{\text{NL}} + n_{p2} * N_{\text{NL}}^2 + n_{p3} * N_{\text{NL}}^3 + l_{p1} * \text{CH}_2\text{O} + l_{p2} * \text{Temp} * \text{CH}_2\text{O} + l_{p3} * \text{Temp}^2 * \text{CH}_2\text{O} + w_{p1} * \text{ALVPD} + w_{p2}$	wenn (Alter3=0) Standard

		*ALVPD/Temp	
	Pn	- apparente Netto-CO ₂ -Austauschrate eines Blattes [kg CO ₂ m ⁻²]	
		= 0	wenn (Alter3=0)
		= $((P_{\max} + \alpha \cdot \text{PAR3} - \theta \cdot R_d) - \sqrt{((P_{\max} + \alpha \cdot \text{PAR3} - \theta \cdot R_d)^2 - 4 \cdot \theta \cdot (\alpha \cdot \text{PAR3} \cdot (P_{\max} - (1 - \theta) \cdot R_d) - R_d \cdot P_{\max})))}) / (2 \cdot \theta)$	Standard
	R_d	- Dunkelatmung [kg CO ₂ m ⁻²]	
		= 0	wenn (Alter3=0)
		= $k_r \cdot \exp(a_r / \text{Alter3})$	Standard
	termX1	- Hilfsterm	
		= 0	wenn (Alter=0)
		= $\sqrt{(X1^2 + 2 \cdot P_m \cdot (1 - 2 \cdot \theta) \cdot X1 + P_m^2)}$	Standard
	termX0	- Hilfsterm	
		= 0	wenn (Alter=0)
		= $\sqrt{(X0^2 + 2 \cdot P_m \cdot (1 - 2 \cdot \theta) \cdot X0 + P_m^2)}$	Standard
	X1	- Hilfsfunktion	
		= 0	wenn (Alter=0)
		= $X0 \cdot \exp(-k_{\text{att}} \cdot \text{LAI})$	Standard
	X0	- Hilfsfunktion	
		= 0	wenn (Alter=0)
		= $(\alpha^2 \cdot k_{\text{att}} \cdot \text{PAR3}) / (1 - m)$	Standard
	Pd	- apparente Tages-Brutto-CO ₂ -Austauschrate sich entwickelnder Blätter	
		= $h \cdot \text{Pc_B3} - (h/2) \cdot (fzX1 - fzX0) \cdot gt$	
p_γ	- Regressionskoeffizienten zur Berechnung der Rate neugebildeter Blätter		
	p_{γ1}	= 0,29685	(s. e.: 0,0870311)
	p_{γ2}	= -8,21018E-09	(s. e.: 3,64381)
	p_{γ3}	= 0,078005	(s. e.: 0,0191005)
	p_{γ4}	= -2762547,516	(s. e.: 585556,017)
	p_{γ5}	= -1,11516	(s. e.: 0,181909)
	p_{γ6}	= 1,85201	(s. e.: 0,120354)
	p_{γ7}	= 0,0333	(s. e.: 0,00298734)
	p_{γ8}	= 0,3586	(s. e.: 0,0446708)
p_{rw}	- Regressionskoeffizienten zur Berechnung der Wurzelatmung		
	p_{rw1}	= -0,00376106	(s. e.: 0,00206441)
	p_{rw2}	= 0,000449816	(s. e.: 0,000098644)
p_{tot}	- Regressionskoeffizienten zur Berechnung der Absterberate		
	p_{tot1}	= -0,299178	(s. e.: 0,0552575)
	p_{tot2}	= 0,126602	(s. e.: 0,0168833)
	p_{tot3}	= 0,614	(s. e.: 0,0533422)
ptr	- Regressionskoeffizienten zur Berechnung der Transpirationsleistung		
	p_{tr1}	= 3,33428E-06	(s. e.: 5,88638E-07)
	p_{tr2}	= 0,0811731	(s. e.: 0,00801216)
	p_{tr3}	= -7,28463E-10	(s. e.: 7,49762E-09)
	p_{tr4}	= 0,226283	(s. e.: 0,34093)
	p_{tr5}	= 0,146889	(s. e.: 0,0575086)

p_{vivt}	- Korrelationskoeffizient zwischen Einstrahlung und Temperatur = PTR
Rate	- Ereignismodul zur Berechnung von Variablen
γ[t]	$= (p_{\gamma1} + p_{\gamma2} * Lisu + p_{\gamma3} * BFI) * Stw$ wenn (BFI < 2.8) $= ((p_{\gamma4} + p_{\gamma5} * (Lisu * 1000000 + BFI) + Lisu * 1000000 * BFI) / (p_{\gamma6} * Lisu * 1000000 * BFI)) * Stw$ Standard
B_{max}[t]	$= L1 / Anzahl_B1$
B_{mw}	$= (BMw * 41 + B_{max}[t]) / 42$
R_{gsp}	- kumulierter Kohlenstoffbedarf für das Wachstum der Blätter [kg C m ⁻²] dR _{gsp} /dt = +F9 (Startwert=0)
rLF	- relative Luftfeuchtigkeit [%] = relLF
R_msp	- kumulierter Kohlenstoffbedarf für die Erhaltungsaerumung der Blätter [kg C m ⁻²] dR _m sp/dt = +F6 (Startwert=0)
R_{wu}	- kumulierter Kohlenstoffbedarf für die Erhaltungs- und Wachstumsaerumung sowie die Energiebereitstellung der Nährionenaufnahme der Wurzeln [kg C m ⁻²] dR _{wu} /dt = +F7 (Startwert=0)
s	- Schalterparameter, Koeffizient für die Steilheit der sigmoidalen Schalterfunktion = 8
Schalter	- Steuervariable für die Aufteilung des Sprosszuwachses auf Blatt- und Blumenwachstum $= z * Blattzuwachs^s / (Blattzuwachs^s + Grenzwert^s)$
σN	- Parameter bei der Berechnung der Stickstoffaufnahme = 6,339
SpZuwachs	- Variable, die die Strukturmasse enthält, die für Sprosswachstum zur Verfügung steht [kg Struktur m ⁻²] dSpZuwachs/dt = -F10 + (F14/f _C + F11/f _N)/2 - F15 (Startwert=0)
Stw	- Standweite der Pflanzen im Bestand [m ⁻²] = 6,7
Temp	- Tagesmitteltemperatur [°C] = TempTag
Temp24	- 24 Stundentagesmitteltemperatur [°C] $= (TempTag * Photo + TempN * (86400 - Photo)) / 86400$
Tens	- Saugspannung in der Steinwollmatte [hPa] = Tensio
T0	- Untergrenze der Temperatur für Photosyntheseaktivität [°C] = 0
Tr	- Transpirationsrate [kg H ₂ O m ⁻²] $= (p_{tr1} * \exp(p_{tr2} * Temp) + p_{tr3} * \exp(p_{tr4} * Temp) * \exp(p_{tr5} * ALVPD)) * BFI * h$
UN	- Stickstoffaufnahme rate [kg N m ⁻²] $= (\sigma_N * N_NL * W_r) / (1 + KC / C * (1 + N / KN))$
v_l	- Variabilitätskoeffizient von PAR = PARV
v_T	- Variabilitätskoeffizient der Tagesmitteltemperatur = TempV
vx	- Hilfsparameter

	= 0 (Startwert)	
W_C	- Menge des verfügbaren C-Substrates [kg C m ⁻²] dW _C /dt= Pd_B1*12/44+Pd_B2*12/44+Pd_B3*12/44-F14-F16-F6-F9 -F7+CR (Startwert=0,006743)	
W_g	- gesamte Struktur Trockenmasse [kg Struktur m ⁻²] = W _{sh} +W _r	
WL	- Ereignismodul für die Berechnung von Variablen Lisu - Wochenlichtsumme [MW s m ⁻² PAR] Lisu=Lisu*6/7+PAR*h/1000000	
W_N	- Menge des verfügbaren N-Substrates [kg N m ⁻²] dW _N /dt=-F11+Un-F17+NR (Startwert=0,0003245)	
W_r	- Wurzelstruktur Trockenmasse [kg Struktur m ⁻²] dW _r /dt = +F16+F17-F18 (Startwert=0,07548)	
W_S	- gesamte Substrattrockenmasse [kg m ⁻²] = W _C *30/12+W _N *62/14	
W_{sh}	- Sprossstruktur Trockenmasse [kg Struktur m ⁻²] = B1+B2+B3+Blumen	
W_t	- kumulierte abgestorbene Wurzelstruktur Trockenmasse [kg Struktur m ⁻²] dW _t /dt = +F18 (Startwert=0)	
Y	- Effizienz der Substratverwendung für Zuwachs [kg C für neue Struktur/kg C des Substratspeichers] = 0,75	
z	- Parameter, der den maximalen Anteil an Blumentzuwachs am gesamten Sprosszuwachs bestimmt = 0,738651 (s. e.: 0,0560572)	
Zähler	- Ereignismodul zur Berechnung von Variablen vx=t wenn (t=A _{max}) Anzahl_B1=Anzahl_B1-F4/B _{max} [t-1]; Alter_B1=Alter_B1*Anzahl_B1+Anzahl_B1+γ[t]; Anzahl_B1=Anzahl_B1+γ[t]; Alter_B1=Alter_B1/Anzahl_B1; {Anzahl_B2=Anzahl_B2-F1/BMw; Alter_B2=Alter_B2*Anzahl_B2+Anzahl_B2+F4/B _{max} [t-1]*A _{max} ; Anzahl_B2=Anzahl_B2+F4/B _{max} [t-1]; Alter_B2=Alter_B2/Anzahl_B2;} wenn (t<100-vx) {Anzahl_B2=Anzahl_B2-F5/B _{max} [t-100+vx]-F1/BMw; Alter_B2=Alter_B2*Anzahl_B2+Anzahl_B2+F4/B _{max} [t-1]*A _{max} ; Anzahl_B2=Anzahl_B2+F4/B _{max} [t-1]; Alter_B2=Alter_B2/Anzahl_B2; Anzahl_B3=Anzahl_B3-F13/BMw; Alter_B3=Alter_B3*Anzahl_B3+Anzahl_B3+F5/B _{max} [t-100+vx]*100; Anzahl_B3=Anzahl_B3+F5/B _{max} [t-100+vx]; Alter_B3=Alter_B3/Anzahl_B3;} wenn (t>=100-vx) A _{maxalt} =A _{max}	

Anhang D - Tabellenanhang

Tab. 8: Blattbreiten- und -längen, deren Produkte sowie gemessene und berechnete Blattflächen und -trockengewichte von 100 Blättern von *Gerbera jamesonii* der Sorte 'Moana'.

Blatt breite [cm]	Blatt länge [cm]	Blatt breite *Blatt länge [cm ²]	Blatt fläche [cm ²]	Blatt trocken gewicht [g]	Blattfläche= 0,46*Blatt breite *Blattlänge [cm ²] (B=0,99)	Blatttrocken gewicht= 0,0054*Blatt fläche [g] (B=0,98)
16,98	24,41	414,48	198,84	0,94	190,66	1,07
21,28	33,92	721,82	363,53	1,71	332,04	1,96
16,85	25,00	421,25	240,33	1,06	193,78	1,30
15,30	22,16	339,05	143,13	0,63	155,96	0,77
20,67	30,39	628,16	301,70	1,41	288,95	1,63
20,20	29,02	586,20	268,03	1,33	269,65	1,45
11,61	20,54	238,47	113,71	0,39	109,70	0,61
15,10	28,24	426,42	170,44	0,92	196,16	0,92
7,79	19,02	148,17	44,25	0,38	68,16	0,24
23,89	25,00	597,25	318,33	1,53	274,74	1,72
16,64	29,02	482,89	184,03	1,15	222,13	0,99
19,13	27,55	527,03	231,48	1,14	242,43	1,25
13,96	24,41	340,76	131,88	0,81	156,75	0,71
16,17	26,67	431,25	193,26	0,89	198,38	1,04
20,40	32,25	657,90	323,69	1,71	302,63	1,75
22,35	34,31	766,83	366,13	2,20	352,74	1,98
22,48	36,37	817,60	386,29	2,30	376,09	2,09
10,74	18,92	203,20	79,79	0,50	93,47	0,43
19,46	27,40	533,20	257,35	1,12	245,27	1,39
17,52	25,78	451,67	243,66	1,25	207,77	1,32
17,72	20,78	368,22	155,54	0,90	169,38	0,84
17,32	23,43	405,81	211,71	1,10	186,67	1,14
14,70	26,27	386,17	141,25	0,57	177,64	0,76
18,05	27,35	493,67	191,49	0,76	227,09	1,03
22,35	29,12	650,83	286,01	1,76	299,38	1,54
18,93	23,92	452,81	246,10	1,23	208,29	1,33
21,41	30,39	650,65	323,89	1,35	299,30	1,75
13,89	21,42	297,52	115,39	0,63	136,86	0,62
16,04	24,07	386,08	172,81	0,95	177,60	0,93
13,49	24,95	336,58	131,36	0,72	154,82	0,71
23,22	35,34	820,59	346,76	1,76	377,47	1,87
20,13	33,53	674,96	334,37	1,91	310,48	1,81
14,56	28,04	408,26	178,83	1,11	187,80	0,97
20,81	29,30	609,73	307,98	1,20	280,48	1,66
22,01	25,39	558,83	335,93	2,07	257,06	1,81
13,42	15,93	213,78	81,95	0,49	98,34	0,44

13,56	19,90	269,84	91,64	0,62	124,13	0,49
22,82	26,91	614,09	299,00	1,73	282,48	1,61
13,76	18,03	248,08	98,12	0,40	114,12	0,53
15,77	24,12	380,37	155,81	0,68	174,97	0,84
13,89	22,89	317,94	104,74	0,53	146,25	0,57
14,09	22,11	311,53	130,41	0,39	143,30	0,70
14,90	20,20	300,98	104,23	0,28	138,45	0,56
20,94	26,86	562,45	269,35	1,66	258,73	1,45
15,77	23,92	377,22	193,52	0,84	173,52	1,05
17,72	21,67	383,99	160,32	0,92	176,64	0,87
18,26	25,15	459,24	251,49	1,10	211,25	1,36
5,44	12,84	69,85	32,56	0,22	32,13	0,18
21,28	26,37	561,15	280,35	1,64	258,13	1,51
16,04	19,61	314,54	128,19	0,67	144,69	0,69
16,11	27,16	437,55	175,02	1,14	201,27	0,95
15,64	23,43	366,45	150,80	0,67	168,56	0,81
9,87	21,76	214,77	88,09	0,61	98,79	0,48
11,14	20,00	222,80	69,18	0,34	102,49	0,37
7,85	13,43	105,43	54,95	0,33	48,50	0,30
15,17	25,49	386,68	174,48	1,08	177,87	0,94
16,11	18,19	293,04	82,88	0,36	134,80	0,45
9,19	10,39	95,48	36,01	0,11	43,92	0,19
14,90	25,74	383,53	166,12	0,75	176,42	0,90
12,82	24,22	310,50	140,70	0,58	142,83	0,76
20,34	28,48	579,28	240,60	1,43	266,47	1,30
17,38	23,63	410,69	166,00	1,06	188,92	0,90
15,57	26,13	406,84	153,15	0,90	187,15	0,83
10,87	17,75	192,94	83,45	0,32	88,75	0,45
14,70	18,92	278,12	150,58	0,61	127,94	0,81
12,28	20,34	249,78	97,97	0,34	114,90	0,53
7,38	11,91	87,90	37,19	0,21	40,43	0,20
12,75	18,97	241,87	75,39	0,37	111,26	0,41
9,46	17,94	169,71	77,09	0,24	78,07	0,42
17,72	28,33	502,01	208,93	1,33	230,92	1,13
12,62	21,76	274,61	118,97	0,63	126,32	0,64
19,53	25,25	493,13	212,65	0,80	226,84	1,15
21,07	30,69	646,64	231,05	1,06	297,45	1,25
12,55	24,17	303,33	111,26	0,55	139,53	0,60
12,01	20,49	246,08	97,97	0,32	113,20	0,53
14,83	23,04	341,68	187,80	0,91	157,17	1,01
16,31	28,43	463,69	195,96	1,14	213,30	1,06
17,05	26,37	449,61	185,81	0,84	206,82	1,00
12,75	19,90	253,73	118,86	0,52	116,71	0,64
14,23	22,55	320,89	158,78	0,67	147,61	0,86
12,62	24,22	305,66	138,52	0,66	140,60	0,75
13,29	21,27	282,68	100,72	0,55	130,03	0,54
15,57	28,38	441,88	172,88	1,06	203,26	0,93
11,28	20,34	229,44	73,67	0,46	105,54	0,40
17,85	27,94	498,73	259,50	1,56	229,42	1,40

14,90	22,99	342,55	132,37	0,50	157,57	0,71
19,33	31,67	612,18	283,50	1,30	281,60	1,53
16,65	28,92	481,52	194,33	0,81	221,50	1,05
18,99	23,58	447,78	222,71	1,23	205,98	1,20
15,70	24,51	384,81	206,18	0,93	177,01	1,11
21,74	30,88	671,33	325,87	1,85	308,81	1,76
17,45	25,74	449,16	239,19	1,18	206,61	1,29
17,32	22,79	394,72	161,64	0,88	181,57	0,87
19,33	26,86	519,20	250,89	1,35	238,83	1,35
23,22	32,25	748,85	353,85	1,92	344,47	1,91
24,50	32,25	790,13	382,26	2,59	363,46	2,06
12,15	19,02	231,09	73,29	0,33	106,30	0,40
9,13	14,85	135,58	42,35	0,16	62,37	0,23
6,58	15,98	105,15	36,40	0,36	48,37	0,20
23,76	31,86	756,99	408,16	2,20	348,22	2,20

Tab. 9: Dauer der Blattentwicklung bis zum Erreichen der maximalen Blattfläche von *Gerbera jamesonii* 'Moana' in Abhängigkeit von der täglichen mittleren Lichtsumme während der Blattentwicklung.

tägliche mittlere Licht summe [MW s m ⁻² d ⁻¹ PAR]	Dauer der Blattent- wicklung [Tage]	tägliche mittlere Licht summe [MW s m ⁻² d ⁻¹ PAR]	Dauer der Blatt entwick- lung [Tage]	tägliche mittlere Licht summe [MW s m ⁻² d ⁻¹ PAR]	Dauer der Blatt entwick- lung [Tage]
0,7	54,7	1,3	50,7	2,4	27,1
0,7	43,6	1,3	49,2	2,8	33,1
0,7	48,0	1,6	38,2	2,9	29,2
0,7	48,4	1,6	31,8	2,9	27,5
0,8	46,0	1,7	35,4	3,0	36,8
0,8	49,9	1,9	56,9	3,0	44,4
0,8	58,7	1,9	53,6	3,0	42,1
0,9	60,6	1,9	50,5	3,0	42,5
0,9	52,8	2,2	51,4	3,0	29,8
1,1	40,7	2,3	50,1	3,0	29,1
1,2	45,1	2,4	29,5	3,1	21,2
1,2	41,2	2,4	44,4	3,2	20,8
1,3	58,2	2,4	31,9	3,2	20,5

Tab. 10: Aufstellung der Messwerte der Prüfmerkmale an den Blumen während der Wachstumsbeobachtungen an *Gerbera jamesonii* 'Moana' in Abhängigkeit von der Wochenlichtsumme.

Wochen licht summe [PAR MW s m ⁻²]	Stiellänge [cm]	Stiellänge durch messer [cm]	Blüten stand durch messer [cm]	FG [g]	TG [g]	TG/FG
3,325	44,06	5,26	10,06	19,78	2,61	0,132
3,410	51,35	6,55	11,05	29,83	3,12	0,104
4,093	39,25	5,03	9,03	14,75	1,84	0,125
4,874	48,92	5,54	9,69	22,16	2,76	0,125
5,449	43,12	5,88	10,02	21,47	2,64	0,123
5,880	43,80	5,62	10,44	21,40	2,32	0,108
6,068	40,50	5,55	9,65	19,00	2,29	0,121
6,349	50,46	5,62	9,55	23,50	2,48	0,106
8,884	42,75	-----	10,36	24,62	3,32	0,135
9,663	41,08	-----	10,33	23,28	3,08	0,132
10,136	42,68	-----	10,90	27,26	4,42	0,162
12,474	45,75	-----	11,20	31,61	3,86	0,122
12,686	42,34	-----	10,20	23,62	3,73	0,158
13,075	44,96	-----	10,86	31,91	4,85	0,152
13,195	44,08	-----	11,00	29,54	3,85	0,130
16,282	50,29	6,46	10,28	28,68	3,89	0,136
17,250	46,96	6,11	10,90	26,39	4,19	0,159

18,413	46,60	5,83	10,37	23,25	3,49	0,150
20,506	46,74	6,25	10,56	27,05	3,84	0,142
20,580	38,78	-----	10,28	28,35	4,15	0,146
20,687	44,20	-----	11,45	31,80	4,81	0,151
21,475	43,10	-----	12,13	36,45	5,75	0,158
22,982	45,28	6,74	11,03	30,81	4,49	0,146
23,568	47,29	6,35	10,73	27,58	4,15	0,150
23,749	42,10	6,52	10,53	25,39	3,45	0,136

Tab. 11: Interception der auf den Bestand auftreffenden Einstrahlung durch die Blätter eines Bestandes von *Gerbera jamesonii* 'Moana' in Abhängigkeit vom vorhandenen Blattflächenindex.

Blattflächenindex BFI [m ² Blattfläche m ⁻² Boden]	Lichtinterception durch die Blätter des Bestandes [1=100 %]	berechnete Lichtinterception $y=1-\exp(-0,717 \cdot \text{BFI})$ (B=0,93)	Blattflächenindex BFI [m ² Blattfläche m ⁻² Boden]	Lichtinterception durch die Blätter des Bestandes [1=100 %]	berechnete Lichtinterception $y=1-\exp(-0,717 \cdot \text{BFI})$ (B=0,93)
0,22	0,14	0,14	2,81	0,85	0,89
0,31	0,20	0,21	2,86	0,93	0,89
0,39	0,27	0,27	2,90	0,93	0,89
0,51	0,31	0,32	2,92	0,93	0,89
0,63	0,38	0,37	2,93	0,88	0,90
0,72	0,40	0,42	2,94	0,83	0,90
0,80	0,45	0,46	2,97	0,82	0,90
0,88	0,49	0,50	2,98	0,91	0,90
1,05	0,53	0,54	3,03	0,86	0,90
1,12	0,61	0,57	3,04	0,90	0,90
1,24	0,58	0,60	3,06	0,97	0,91
1,32	0,64	0,63	3,07	0,87	0,91
1,43	0,68	0,66	3,10	0,90	0,91
1,53	0,70	0,68	3,28	0,89	0,92
1,59	0,71	0,71	3,29	0,96	0,92
1,71	0,77	0,73	3,57	0,94	0,94
1,80	0,74	0,75	3,59	0,92	0,94
1,92	0,77	0,77	3,59	0,88	0,94
2,00	0,77	0,79	3,69	0,89	0,94
2,01	0,93	0,79	3,78	0,87	0,95
2,14	0,80	0,80	4,23	0,93	0,96
2,23	0,85	0,82	4,44	0,92	0,97
2,28	0,86	0,83	4,56	0,90	0,97
2,39	0,84	0,84	4,68	0,87	0,97
2,46	0,91	0,85	4,71	0,99	0,97
2,50	0,88	0,85	5,07	0,94	0,98
2,64	0,85	0,87	5,37	0,96	0,98
2,70	0,92	0,87	6,21	0,89	0,99
2,75	0,87	0,88	6,46	0,93	0,99
2,75	0,92	0,88	6,63	0,95	0,99

2,77	0,91	0,88	6,79	0,96	0,99
2,78	0,95	0,88	7,01	0,96	1,00

Tab. 12: Apparente Netto-CO₂-Austauschrate von *Gerbera jamesonii* 'Moana' gemessen an vollentwickelten Blättern in Abhängigkeit der Küvettentemperatur und der Einstrahlungsstärke sowie mit Hilfe von Gleichung (9) berechnete Werte.

gemessene Küvettentemperatur [°C]	Einstrahlungsstärke [W m ⁻²]	apparente Netto-CO ₂ -Austauschrate [kg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹]	berechnete Netto-CO ₂ -Austauschrate [kg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹]	gemessene Küvettentemperatur [°C]	Einstrahlungsstärke [W m ⁻²]	apparente Netto-CO ₂ -Austauschrate [kg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹]	berechnete Netto-CO ₂ -Austauschrate [kg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹]
5,77	2,39	-2,00E-08	2,47E-08	8,86	55,22	3,90E-07	2,54E-07
6,43	2,39	5,90E-09	2,47E-08	7,97	55,22	1,40E-07	2,54E-07
5,96	2,57	7,80E-09	2,59E-08	7,85	55,22	2,70E-07	2,54E-07
5,92	2,61	-2,30E-08	2,62E-08	8,00	55,35	1,60E-07	2,55E-07
5,43	5,30	4,10E-08	4,11E-08	8,02	112,17	3,70E-07	3,12E-07
6,13	5,39	2,10E-08	4,15E-08	7,98	112,17	2,40E-07	3,12E-07
5,98	5,48	3,90E-08	4,19E-08	8,05	112,17	3,60E-07	3,12E-07
6,09	10,00	8,70E-08	5,93E-08	8,06	168,70	3,30E-07	3,40E-07
5,93	10,00	2,40E-08	5,93E-08	8,00	168,70	2,40E-07	3,40E-07
6,59	10,87	7,60E-08	6,21E-08	8,11	168,70	4,20E-07	3,40E-07
6,02	21,09	2,40E-07	8,83E-08	7,99	225,87	3,20E-07	3,57E-07
5,53	21,09	1,50E-07	8,83E-08	8,04	225,87	3,10E-07	3,57E-07
6,45	21,09	1,40E-07	8,83E-08	7,98	225,87	3,80E-07	3,57E-07
6,09	55,22	3,40E-08	1,42E-07	8,00	282,43	3,10E-07	3,68E-07
6,26	55,22	2,50E-07	1,42E-07	8,02	282,52	4,10E-07	3,68E-07
5,97	55,26	6,90E-08	1,42E-07	8,04	282,57	3,40E-07	3,68E-07
5,94	112,04	3,30E-07	1,96E-07	8,00	339,35	4,20E-07	3,77E-07
6,07	168,70	1,50E-07	2,33E-07	8,04	339,35	4,60E-07	3,77E-07
5,96	168,70	1,10E-07	2,33E-07	7,41	339,39	3,60E-07	3,77E-07
6,05	168,70	3,10E-07	2,33E-07	10,05	2,39	8,90E-09	-5,20E-09
5,72	225,74	2,10E-07	2,62E-07	10,01	2,57	2,30E-09	-4,89E-10
5,92	225,87	1,20E-07	2,62E-07	10,03	2,57	1,10E-08	-4,89E-10
5,95	282,48	1,60E-07	2,86E-07	10,01	2,61	-1,30E-08	5,30E-10
5,91	282,52	2,70E-07	2,86E-07	9,99	5,43	3,20E-08	5,58E-08
6,00	282,57	3,70E-07	2,86E-07	10,04	5,43	3,90E-08	5,58E-08
6,00	339,35	3,80E-07	3,06E-07	10,04	5,43	5,50E-08	5,58E-08
6,85	339,35	3,70E-07	3,06E-07	10,12	5,61	5,90E-08	5,85E-08
5,96	339,39	3,70E-07	3,06E-07	10,05	10,00	9,10E-08	1,12E-07
7,97	2,39	1,30E-08	1,24E-08	10,03	10,00	1,10E-07	1,12E-07
7,97	2,48	-1,10E-08	1,43E-08	10,14	10,96	1,10E-07	1,22E-07
8,15	2,48	1,60E-08	1,43E-08	10,02	11,09	1,40E-07	1,23E-07
8,08	5,30	1,20E-07	5,88E-08	10,04	21,09	2,50E-07	1,93E-07
8,01	5,43	4,40E-08	6,04E-08	9,97	21,09	1,80E-07	1,93E-07
8,02	5,43	3,90E-08	6,04E-08	10,04	21,13	2,00E-07	1,93E-07
8,03	5,61	5,30E-08	6,26E-08	10,07	21,22	2,10E-07	1,93E-07
8,06	10,00	9,80E-08	1,05E-07	9,93	55,22	3,60E-07	3,05E-07

8,02	10,00	7,10E-08	1,05E-07	10,02	55,22	2,60E-07	3,05E-07
7,51	10,91	1,10E-07	1,12E-07	10,11	55,22	3,40E-07	3,05E-07
7,91	10,96	1,30E-07	1,12E-07	10,05	55,30	2,80E-07	3,05E-07
7,93	11,09	1,20E-07	1,13E-07	10,03	112,13	4,40E-07	3,80E-07
8,01	21,09	2,60E-07	1,68E-07	9,98	112,17	2,70E-07	3,80E-07
7,96	21,09	1,70E-07	1,68E-07	9,98	112,17	4,30E-07	3,80E-07
8,76	21,09	1,00E-07	1,68E-07	10,12	168,70	4,80E-07	4,17E-07
7,99	21,30	2,20E-07	1,69E-07	10,11	168,78	4,10E-07	4,17E-07
10,07	168,78	3,00E-07	4,17E-07	14,05	2,61	5,00E-09	3,71E-09
9,55	225,70	3,40E-07	4,39E-07	14,05	5,43	4,10E-08	4,47E-08
10,04	225,87	4,60E-07	4,39E-07	14,10	5,43	5,20E-08	4,47E-08
10,04	225,87	4,50E-07	4,39E-07	14,09	5,43	6,40E-08	4,47E-08
10,05	282,61	4,30E-07	4,54E-07	14,00	5,52	3,30E-08	4,60E-08
10,04	282,61	3,50E-07	4,54E-07	14,04	10,00	8,70E-08	1,05E-07
10,00	282,61	4,80E-07	4,54E-07	14,03	10,13	8,90E-08	1,07E-07
10,00	339,35	6,00E-07	4,65E-07	13,63	10,87	1,30E-07	1,16E-07
10,07	339,35	5,20E-07	4,65E-07	14,05	10,91	1,20E-07	1,16E-07
10,02	339,39	4,60E-07	4,65E-07	14,01	21,09	2,40E-07	2,21E-07
12,06	2,52	2,10E-08	6,99E-09	14,09	21,22	2,00E-07	2,22E-07
12,05	2,52	1,00E-08	6,99E-09	14,02	21,22	2,30E-07	2,22E-07
12,02	2,61	-2,90E-09	8,35E-09	14,04	21,30	2,20E-07	2,23E-07
12,08	5,43	4,70E-08	4,91E-08	14,13	55,22	4,70E-07	3,94E-07
12,03	5,43	5,00E-08	4,91E-08	14,03	55,26	4,10E-07	3,94E-07
12,10	5,57	5,50E-08	5,11E-08	14,09	55,26	3,80E-07	3,94E-07
12,05	10,00	9,60E-08	1,08E-07	14,11	55,30	3,40E-07	3,95E-07
12,04	10,04	9,20E-08	1,09E-07	14,01	112,17	5,40E-07	4,78E-07
12,05	10,87	9,70E-08	1,18E-07	14,10	112,17	3,70E-07	4,78E-07
12,08	11,04	1,40E-07	1,20E-07	13,96	112,17	4,40E-07	4,78E-07
12,04	21,09	2,60E-07	2,18E-07	14,05	168,70	5,00E-07	5,07E-07
12,02	21,09	2,30E-07	2,18E-07	14,05	168,70	6,00E-07	5,07E-07
12,00	21,26	2,20E-07	2,19E-07	14,06	168,70	4,50E-07	5,07E-07
12,03	21,30	2,10E-07	2,20E-07	14,07	168,70	6,00E-07	5,07E-07
12,00	55,22	3,80E-07	3,79E-07	14,12	225,83	4,40E-07	5,21E-07
12,02	55,22	3,60E-07	3,79E-07	14,11	225,87	5,70E-07	5,21E-07
12,04	55,22	4,00E-07	3,79E-07	14,10	225,87	5,40E-07	5,21E-07
12,02	55,26	3,00E-07	3,79E-07	14,05	282,43	4,90E-07	5,30E-07
12,01	112,17	5,00E-07	4,59E-07	14,15	282,43	4,30E-07	5,30E-07
12,08	112,17	5,40E-07	4,59E-07	14,00	282,48	5,10E-07	5,30E-07
12,05	168,70	4,40E-07	4,87E-07	14,08	282,61	5,60E-07	5,30E-07
12,04	168,70	5,10E-07	4,87E-07	14,01	339,35	5,00E-07	5,35E-07
12,09	168,70	3,60E-07	4,87E-07	14,12	339,35	5,60E-07	5,35E-07
12,73	168,70	5,90E-07	4,87E-07	14,03	339,39	6,30E-07	5,35E-07
12,05	225,83	5,20E-07	5,02E-07	16,04	2,61	-7,40E-09	4,98E-09
12,02	225,87	5,00E-07	5,02E-07	16,03	2,61	1,10E-08	4,98E-09
12,05	282,52	4,70E-07	5,10E-07	16,01	2,61	7,80E-09	4,98E-09
12,12	282,52	4,10E-07	5,10E-07	16,04	5,43	3,40E-08	4,10E-08
12,00	282,52	5,40E-07	5,10E-07	16,06	5,43	3,80E-08	4,10E-08
12,04	282,57	4,80E-07	5,10E-07	16,04	5,43	5,40E-08	4,10E-08

12,00	339,35	4,80E-07	5,16E-07	16,06	10,04	9,90E-08	9,68E-08
12,03	339,35	6,10E-07	5,16E-07	16,04	10,17	9,50E-08	9,83E-08
12,06	339,35	5,60E-07	5,16E-07	15,96	10,87	1,20E-07	1,06E-07
14,07	2,43	-9,40E-09	9,94E-10	16,03	11,00	1,00E-07	1,08E-07
14,06	2,57	2,50E-08	3,11E-09	15,99	21,09	2,30E-07	2,13E-07
14,06	2,61	-7,40E-09	3,71E-09	16,07	21,17	2,20E-07	2,14E-07
16,03	21,22	1,90E-07	2,15E-07	18,05	168,70	6,80E-07	5,68E-07
16,01	21,26	2,10E-07	2,15E-07	18,03	168,70	4,70E-07	5,68E-07
16,09	55,22	4,90E-07	4,20E-07	18,31	168,70	6,50E-07	5,68E-07
16,09	55,30	4,40E-07	4,20E-07	18,04	225,74	4,40E-07	5,86E-07
16,07	55,30	3,70E-07	4,20E-07	18,03	225,78	5,80E-07	5,86E-07
16,06	55,43	3,90E-07	4,20E-07	18,07	225,87	7,30E-07	5,86E-07
15,99	112,17	5,60E-07	5,19E-07	18,00	282,39	4,30E-07	5,97E-07
16,02	112,17	3,70E-07	5,19E-07	18,01	282,39	5,70E-07	5,97E-07
16,04	112,17	5,80E-07	5,19E-07	18,05	282,43	5,90E-07	5,97E-07
16,05	168,70	5,50E-07	5,50E-07	18,08	282,61	6,50E-07	5,97E-07
16,05	168,70	6,70E-07	5,50E-07	18,06	339,35	6,50E-07	6,04E-07
16,05	168,70	4,60E-07	5,50E-07	18,02	339,39	6,80E-07	6,04E-07
16,14	168,70	6,20E-07	5,50E-07	18,07	339,48	5,70E-07	6,04E-07
16,04	225,83	4,40E-07	5,65E-07	20,05	2,17	-7,60E-09	1,82E-08
16,04	225,83	5,90E-07	5,65E-07	20,04	2,35	4,80E-09	2,00E-08
16,05	225,87	6,50E-07	5,65E-07	20,00	2,43	1,80E-08	2,08E-08
16,10	282,39	4,30E-07	5,73E-07	20,06	5,22	3,40E-08	4,80E-08
16,02	282,39	5,90E-07	5,73E-07	20,04	5,43	5,50E-08	5,00E-08
16,09	282,48	5,90E-07	5,73E-07	20,06	5,43	5,80E-08	5,00E-08
16,08	282,48	5,50E-07	5,73E-07	20,06	9,78	8,80E-08	9,11E-08
16,00	339,35	5,30E-07	5,78E-07	20,08	10,13	1,40E-07	9,43E-08
16,07	339,35	6,10E-07	5,78E-07	20,01	11,09	9,80E-08	1,03E-07
16,02	339,43	6,80E-07	5,78E-07	20,09	11,09	1,10E-07	1,03E-07
18,05	2,30	-1,70E-08	-6,62E-09	20,04	21,04	1,90E-07	1,90E-07
18,04	2,52	-1,10E-08	-3,32E-09	20,00	21,17	2,20E-07	1,91E-07
18,04	2,61	1,30E-08	-1,97E-09	20,05	21,30	1,70E-07	1,92E-07
18,04	2,61	2,30E-09	-1,97E-09	20,04	21,30	2,10E-07	1,92E-07
18,00	5,22	2,10E-08	3,61E-08	20,04	55,22	4,50E-07	4,04E-07
18,03	5,22	3,70E-08	3,61E-08	20,02	55,22	2,60E-07	4,04E-07
18,04	5,43	3,60E-08	3,91E-08	20,07	55,22	4,40E-07	4,04E-07
18,03	5,52	5,40E-08	4,03E-08	20,04	55,35	4,30E-07	4,05E-07
18,06	9,91	8,80E-08	9,94E-08	20,02	111,96	5,80E-07	5,40E-07
18,07	10,17	1,30E-07	1,03E-07	19,96	112,13	5,30E-07	5,41E-07
18,07	11,04	1,30E-07	1,14E-07	20,02	112,17	4,40E-07	5,41E-07
18,01	11,09	9,40E-08	1,14E-07	20,04	168,70	7,00E-07	5,83E-07
18,02	21,13	2,20E-07	2,24E-07	20,04	168,70	6,90E-07	5,83E-07
18,05	21,26	2,10E-07	2,25E-07	20,05	168,70	4,50E-07	5,83E-07
18,03	21,26	2,10E-07	2,25E-07	20,01	168,70	6,40E-07	5,83E-07
18,02	21,30	2,40E-07	2,26E-07	20,04	225,65	8,20E-07	6,02E-07
18,06	55,22	5,00E-07	4,27E-07	20,05	225,74	4,70E-07	6,02E-07
18,05	55,26	3,50E-07	4,27E-07	20,02	225,78	5,90E-07	6,02E-07
18,05	55,35	4,50E-07	4,27E-07	20,07	225,83	6,60E-07	6,02E-07

18,08	55,43	4,50E-07	4,28E-07	20,03	282,39	4,30E-07	6,13E-07
18,01	112,17	5,80E-07	5,32E-07	20,02	282,39	5,90E-07	6,13E-07
18,16	112,17	3,60E-07	5,32E-07	20,04	282,43	5,80E-07	6,13E-07
18,09	112,17	5,40E-07	5,32E-07	20,06	282,48	7,00E-07	6,13E-07
18,07	168,70	6,30E-07	5,68E-07	20,03	339,35	5,20E-07	6,20E-07
20,05	339,35	6,30E-07	6,20E-07	24,03	5,22	3,60E-08	3,66E-08
20,03	339,39	6,90E-07	6,20E-07	24,04	5,43	5,40E-08	3,86E-08
20,11	339,43	6,00E-07	6,20E-07	24,04	9,78	7,30E-08	7,86E-08
22,01	2,35	-9,00E-09	-3,73E-09	24,04	9,83	7,70E-08	7,90E-08
22,02	2,35	5,70E-09	-3,73E-09	24,02	10,87	8,40E-08	8,85E-08
22,05	2,39	-3,00E-08	-3,20E-09	24,03	11,09	9,40E-08	9,05E-08
22,01	2,52	1,40E-08	-1,50E-09	24,01	20,87	2,10E-07	1,77E-07
22,03	5,22	1,90E-08	3,28E-08	24,03	20,91	1,80E-07	1,77E-07
22,03	5,22	3,50E-08	3,28E-08	24,03	20,91	1,70E-07	1,77E-07
22,04	5,22	3,60E-08	3,28E-08	24,04	21,04	1,90E-07	1,78E-07
22,04	5,43	5,60E-08	3,53E-08	24,04	55,17	3,30E-07	4,18E-07
22,04	9,78	7,90E-08	8,62E-08	24,02	55,22	4,40E-07	4,18E-07
22,02	10,17	7,80E-08	9,06E-08	24,03	55,22	4,30E-07	4,18E-07
22,04	11,04	9,50E-08	1,00E-07	24,04	55,22	4,50E-07	4,18E-07
22,04	11,04	9,80E-08	1,00E-07	24,02	111,96	6,00E-07	5,58E-07
22,02	21,00	1,90E-07	1,96E-07	24,04	112,13	4,90E-07	5,58E-07
22,03	21,00	2,00E-07	1,96E-07	24,04	112,17	5,20E-07	5,58E-07
22,04	21,09	2,20E-07	1,97E-07	24,03	168,70	7,30E-07	5,88E-07
22,00	21,17	2,20E-07	1,98E-07	24,02	168,70	6,80E-07	5,88E-07
22,02	55,22	4,40E-07	3,95E-07	24,04	168,70	4,50E-07	5,88E-07
22,03	55,22	4,50E-07	3,95E-07	24,00	225,65	6,50E-07	6,00E-07
22,00	55,22	2,60E-07	3,95E-07	24,03	225,74	8,10E-07	6,00E-07
22,04	55,22	4,10E-07	3,95E-07	24,04	225,74	5,50E-07	6,00E-07
21,99	111,96	5,90E-07	5,25E-07	24,03	282,39	5,80E-07	6,06E-07
22,03	112,13	4,80E-07	5,25E-07	24,05	282,39	4,10E-07	6,06E-07
22,00	112,13	4,40E-07	5,25E-07	24,01	282,39	5,60E-07	6,06E-07
22,03	112,17	4,90E-07	5,25E-07	24,03	282,43	7,30E-07	6,06E-07
22,08	168,70	7,00E-07	5,78E-07	24,04	339,35	6,60E-07	6,10E-07
22,03	168,70	4,80E-07	5,78E-07	24,03	339,35	6,70E-07	6,10E-07
22,02	168,74	6,30E-07	5,78E-07	24,03	339,35	4,70E-07	6,10E-07
21,98	225,65	8,50E-07	6,07E-07	24,07	339,35	5,50E-07	6,10E-07
22,02	225,70	5,00E-07	6,07E-07	26,03	2,17	-2,40E-08	-1,32E-08
22,01	225,78	6,80E-07	6,07E-07	26,02	2,35	-1,50E-08	-1,12E-08
22,03	225,78	5,50E-07	6,07E-07	26,02	2,35	3,50E-10	-1,12E-08
22,04	282,39	5,80E-07	6,24E-07	26,02	2,39	-2,70E-08	-1,08E-08
22,00	282,39	5,80E-07	6,24E-07	26,03	5,22	8,80E-09	1,99E-08
22,05	282,57	7,40E-07	6,24E-07	26,02	5,22	2,10E-08	1,99E-08
21,86	334,09	6,70E-07	6,35E-07	26,03	5,22	2,70E-08	1,99E-08
22,02	339,35	5,00E-07	6,36E-07	26,03	5,39	5,20E-08	2,17E-08
22,03	339,35	5,90E-07	6,36E-07	26,03	9,78	7,70E-08	6,72E-08
22,06	339,39	6,30E-07	6,36E-07	26,03	9,78	5,50E-08	6,72E-08
24,04	2,26	5,70E-09	9,04E-09	26,03	10,78	7,20E-08	7,72E-08
24,02	2,30	1,50E-08	9,41E-09	26,01	10,83	6,40E-08	7,77E-08

24,01	2,39	-1,50E-08	1,03E-08	25,99	20,87	1,90E-07	1,71E-07
24,04	5,22	3,00E-08	3,66E-08	26,03	20,96	1,50E-07	1,72E-07
26,04	21,00	1,70E-07	1,72E-07	28,00	168,70	6,70E-07	5,43E-07
26,00	21,00	2,00E-07	1,72E-07	28,00	168,70	4,30E-07	5,43E-07
26,02	55,09	4,30E-07	3,81E-07	28,02	225,65	6,60E-07	5,60E-07
26,03	55,17	4,00E-07	3,81E-07	28,03	225,65	5,00E-07	5,60E-07
26,02	55,22	3,00E-07	3,82E-07	27,95	225,70	7,20E-07	5,60E-07
26,05	55,22	3,80E-07	3,82E-07	28,02	225,70	4,30E-07	5,60E-07
26,00	112,00	4,20E-07	5,07E-07	28,04	282,39	5,90E-07	5,69E-07
26,02	112,13	4,80E-07	5,07E-07	28,02	282,39	3,80E-07	5,69E-07
25,98	112,17	5,10E-07	5,07E-07	28,00	282,39	5,30E-07	5,69E-07
26,00	113,48	5,90E-07	5,09E-07	28,03	282,48	6,80E-07	5,69E-07
26,02	168,70	6,70E-07	5,49E-07	28,03	339,35	6,50E-07	5,75E-07
25,90	168,70	4,30E-07	5,49E-07	28,02	339,35	4,30E-07	5,75E-07
26,01	168,70	5,60E-07	5,49E-07	28,04	339,35	5,70E-07	5,75E-07
26,04	225,65	5,00E-07	5,69E-07	28,01	339,39	6,60E-07	5,75E-07
26,02	225,65	6,80E-07	5,69E-07	29,98	9,78	4,90E-08	6,15E-08
26,00	225,74	5,30E-07	5,69E-07	30,07	2,26	-2,60E-09	-1,81E-08
26,02	225,78	7,30E-07	5,69E-07	29,95	2,30	-3,50E-08	-1,76E-08
26,00	282,39	5,50E-07	5,80E-07	30,03	2,30	-2,60E-08	-1,76E-08
26,00	282,39	4,00E-07	5,80E-07	30,02	2,35	-4,30E-08	-1,71E-08
26,00	282,39	5,60E-07	5,80E-07	30,00	5,22	-7,90E-10	1,42E-08
26,02	282,52	7,00E-07	5,80E-07	30,02	5,22	9,30E-09	1,42E-08
26,02	339,26	4,50E-07	5,88E-07	30,03	5,22	2,10E-08	1,42E-08
26,03	339,35	6,80E-07	5,88E-07	29,97	5,22	3,80E-08	1,42E-08
26,07	339,35	5,10E-07	5,88E-07	30,00	9,78	8,40E-08	6,15E-08
26,03	339,43	6,80E-07	5,88E-07	30,03	10,65	8,30E-08	7,02E-08
28,04	2,22	-2,80E-08	-4,88E-09	29,96	10,83	8,80E-08	7,20E-08
28,05	2,30	1,50E-09	-4,10E-09	29,98	20,87	1,90E-07	1,64E-07
28,02	2,30	-1,70E-08	-4,10E-09	30,03	20,91	1,50E-07	1,64E-07
28,02	5,22	1,20E-08	2,44E-08	30,02	21,00	1,20E-07	1,65E-07
28,04	5,22	3,70E-08	2,44E-08	30,01	21,00	2,00E-07	1,65E-07
28,02	5,22	4,40E-08	2,44E-08	30,01	55,00	3,80E-07	3,66E-07
27,90	9,78	7,50E-08	6,75E-08	30,02	55,00	3,70E-07	3,66E-07
28,04	9,78	4,90E-08	6,75E-08	30,01	55,09	4,20E-07	3,66E-07
28,02	10,83	7,70E-08	7,72E-08	29,89	55,13	2,50E-07	3,67E-07
28,01	10,83	9,00E-08	7,72E-08	30,00	112,00	5,50E-07	4,90E-07
28,00	20,87	1,80E-07	1,65E-07	30,00	112,00	4,80E-07	4,90E-07
28,02	20,87	1,60E-07	1,65E-07	30,03	112,04	4,80E-07	4,90E-07
28,04	21,00	1,60E-07	1,66E-07	30,01	168,70	6,50E-07	5,33E-07
28,02	21,09	1,90E-07	1,67E-07	30,03	168,70	4,20E-07	5,33E-07
28,02	55,04	4,40E-07	3,77E-07	29,97	168,70	5,50E-07	5,33E-07
28,03	55,04	3,30E-07	3,77E-07	29,98	225,65	6,90E-07	5,54E-07
28,04	55,09	4,00E-07	3,77E-07	30,02	225,65	6,40E-07	5,54E-07
28,09	55,22	3,00E-07	3,78E-07	30,02	225,70	4,90E-07	5,54E-07
28,01	112,00	5,60E-07	5,05E-07	30,01	225,74	4,20E-07	5,54E-07
28,04	112,04	4,90E-07	5,05E-07	30,03	282,39	6,60E-07	5,66E-07
27,98	112,04	5,10E-07	5,05E-07	30,02	282,39	6,10E-07	5,66E-07

28,03	112,09	4,80E-07	5,05E-07	30,04	282,39	3,70E-07	5,66E-07
29,99	282,39	5,30E-07	5,66E-07	30,02	339,35	6,60E-07	5,74E-07
30,03	339,26	5,90E-07	5,74E-07	30,05	339,35	4,30E-07	5,74E-07
30,01	339,35	6,50E-07	5,74E-07				

Tab. 13: Apparente Netto-CO₂-Austauschrate von *Gerbera jamesonii* 'Moana' gemessen an vollentwickelten Blättern in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration der Luft und der Einstrahlungsstärke.

Sollwert der CO ₂ - Konzentration der Luft [ppm]	gemessener Wert der CO ₂ - Konzentration der Luft [kg CO ₂ m ⁻³]	Einstrahlungs- stärke [W m ⁻²]	apparente Netto-CO ₂ - Austausch- rate [kg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹]	Sollwert der CO ₂ - Konzentration der Luft [ppm]	gemessener Wert der CO ₂ - Konzentration der Luft [kg CO ₂ m ⁻³]	Einstrahlungs- stärke [W m ⁻²]	apparente Netto-CO ₂ - Austausch- rate [kg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹]
125	2,4244E-04	21,30	7,8584E-08	550	9,9958E-04	339,17	7,4061E-07
125	2,2972E-04	21,09	5,2976E-08	550	9,9785E-04	339,17	8,8273E-07
125	2,4336E-04	21,30	5,5616E-08	550	1,0071E-03	339,35	5,6311E-07
125	2,4924E-04	21,30	7,3216E-08	550	1,0004E-03	339,35	9,4644E-07
125	2,2890E-04	180,30	1,6412E-07	850	1,5589E-03	21,09	1,9008E-07
125	2,2239E-04	180,22	1,2373E-07	850	1,5482E-03	21,09	3,0158E-07
125	2,3037E-04	180,43	1,1933E-07	850	1,5539E-03	21,30	2,0574E-07
125	2,3676E-04	180,35	1,5743E-07	850	1,5514E-03	21,30	2,8794E-07
125	2,2651E-04	339,35	1,5523E-07	850	1,5593E-03	180,22	6,8376E-07
125	2,2029E-04	339,13	1,2795E-07	850	1,5389E-03	180,22	1,023E-06
125	2,2909E-04	339,35	1,1422E-07	850	1,5708E-03	180,26	6,1767E-07
125	2,3440E-04	339,35	1,577E-07	850	1,5613E-03	180,22	1,1106E-06
340	6,2025E-04	21,22	1,8876E-07	850	1,5659E-03	339,17	1,0069E-06
340	6,0261E-04	21,30	2,1613E-07	850	1,5390E-03	339,22	1,2705E-06
340	6,2273E-04	21,30	1,7565E-07	850	1,5735E-03	339,35	6,9951E-07
340	6,2396E-04	21,30	2,31E-07	850	1,5596E-03	339,35	1,2359E-06
340	6,2237E-04	180,22	3,1856E-07	1260	2,3602E-03	21,30	1,9122E-07
340	6,1203E-04	180,22	4,9526E-07	1260	2,2670E-03	21,09	3,2877E-07
340	6,2399E-04	180,26	3,931E-07	1260	2,2887E-03	21,30	2,3206E-07
340	6,2544E-04	180,22	7,304E-07	1260	2,2634E-03	21,09	3,1715E-07
340	6,2297E-04	339,35	4,4572E-07	1260	2,3608E-03	180,43	9,1538E-07
340	6,1394E-04	339,31	5,6742E-07	1260	2,2761E-03	180,22	1,1634E-06
340	6,2669E-04	339,35	4,1756E-07	1260	2,3031E-03	180,22	7,1896E-07
340	6,2491E-04	339,35	7,1262E-07	1260	2,2571E-03	180,22	1,2701E-06
550	9,9883E-04	21,09	1,7538E-07	1260	2,3513E-03	339,35	1,0392E-06
550	9,9429E-04	21,09	2,2114E-07	1260	2,2749E-03	339,17	1,3735E-06
550	1,0022E-03	21,30	1,6993E-07	1260	2,2933E-03	339,35	8,3424E-07
550	9,9844E-04	21,30	2,5854E-07	1260	2,2692E-03	339,17	1,4853E-06
550	1,0004E-03	180,22	4,1686E-07	1660	3,0599E-03	21,30	3,344E-07
550	9,9760E-04	180,22	6,2973E-07	1660	2,9721E-03	21,09	4,0797E-07
550	1,0066E-03	180,30	4,5927E-07	1660	3,0074E-03	21,30	2,4103E-07
550	9,9794E-04	180,26	8,91E-07	1660	3,1289E-03	21,30	2,8934E-07
1660	3,0458E-03	180,22	1,1606E-06	2050	3,7955E-03	21,30	1,2487E-07

1660	2,9684E-03	180,22	1,265E-06	2050	3,7565E-03	21,30	2,31E-07
1660	3,0098E-03	180,22	7,9895E-07	2050	3,6999E-03	180,22	1,1802E-06
1660	3,1116E-03	180,43	1,3004E-06	2050	3,8233E-03	180,43	7,6041E-07
1660	3,0307E-03	339,35	1,2773E-06	2050	3,8149E-03	180,39	6,9036E-07
1660	2,9528E-03	339,13	1,5172E-06	2050	3,7587E-03	180,39	1,1174E-06
1660	3,0103E-03	339,31	9,4767E-07	2050	3,6528E-03	339,13	1,533E-06
1660	3,0868E-03	339,35	1,5085E-06	2050	3,8270E-03	339,35	8,2201E-07
2050	3,7281E-03	21,22	3,2384E-07	2050	3,8145E-03	339,35	7,7035E-07
2050	3,8203E-03	21,30	1,8823E-07	2050	3,7482E-03	339,35	1,3031E-06

Tab. 14: Mit Gleichung (9) berechnete Netto-CO₂-Austauschrate von *Gerbera jamesonii* 'Moana' in Abhängigkeit von Blattalter Einstrahlung und Lufttemperatur bei einer mittleren CO₂-Konzentration von 7,13E-04 kg CO₂ m⁻³ (390 ppm).

Einstrahlungsstärke [W m ⁻²]	Lufttemperatur [°C]	berechnete Netto-CO ₂ -Austauschrate [kg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹]					
		Blattalter					
		20 Tage	50 Tage	100 Tage	150 Tage	200 Tage	250 Tage
5	10	-1,6E-08	-3,39E-09	-2,29E-09	-2,1E-09	-2E-09	-2,1E-09
20	10	1,59E-07	7,06E-08	4,72E-08	4,02E-08	3,6E-08	3,18E-08
40	10	2,3E-07	1,41E-07	9,94E-08	8,4E-08	7,28E-08	6,01E-08
60	10	2,55E-07	1,86E-07	1,37E-07	1,14E-07	9,6E-08	7,5E-08
80	10	2,67E-07	2,13E-07	1,62E-07	1,35E-07	1,11E-07	8,34E-08
100	10	2,74E-07	2,3E-07	1,8E-07	1,48E-07	1,2E-07	8,85E-08
120	10	2,78E-07	2,42E-07	1,92E-07	1,58E-07	1,26E-07	9,18E-08
140	10	2,82E-07	2,51E-07	2,01E-07	1,65E-07	1,31E-07	9,42E-08
160	10	2,84E-07	2,57E-07	2,08E-07	1,7E-07	1,34E-07	9,6E-08
180	10	2,86E-07	2,62E-07	2,13E-07	1,74E-07	1,37E-07	9,73E-08
200	10	2,87E-07	2,66E-07	2,17E-07	1,78E-07	1,39E-07	9,84E-08
220	10	2,89E-07	2,69E-07	2,21E-07	1,8E-07	1,4E-07	9,93E-08
240	10	2,9E-07	2,71E-07	2,24E-07	1,82E-07	1,42E-07	1E-07
260	10	2,9E-07	2,74E-07	2,26E-07	1,84E-07	1,43E-07	1,01E-07
280	10	2,91E-07	2,75E-07	2,28E-07	1,86E-07	1,44E-07	1,01E-07
300	10	2,92E-07	2,77E-07	2,3E-07	1,87E-07	1,45E-07	1,02E-07
5	20	-4,2E-08	1,89E-08	2,23E-08	2,23E-08	2,16E-08	1,94E-08
20	20	1,53E-07	1,44E-07	1,26E-07	1,14E-07	9,83E-08	6,71E-08
40	20	2,99E-07	2,58E-07	2,18E-07	1,85E-07	1,43E-07	8,22E-08
60	20	3,69E-07	3,25E-07	2,69E-07	2,19E-07	1,6E-07	8,72E-08
80	20	4,06E-07	3,64E-07	2,99E-07	2,38E-07	1,69E-07	8,96E-08
100	20	4,28E-07	3,89E-07	3,18E-07	2,49E-07	1,74E-07	9,1E-08
120	20	4,43E-07	4,05E-07	3,3E-07	2,57E-07	1,78E-07	9,19E-08
140	20	4,53E-07	4,17E-07	3,39E-07	2,62E-07	1,8E-07	9,25E-08
160	20	4,61E-07	4,26E-07	3,46E-07	2,66E-07	1,82E-07	9,3E-08
180	20	4,67E-07	4,32E-07	3,51E-07	2,69E-07	1,83E-07	9,34E-08
200	20	4,71E-07	4,38E-07	3,55E-07	2,71E-07	1,84E-07	9,37E-08
220	20	4,75E-07	4,42E-07	3,58E-07	2,73E-07	1,85E-07	9,39E-08
240	20	4,78E-07	4,45E-07	3,6E-07	2,75E-07	1,86E-07	9,41E-08

260	20	4,81E-07	4,48E-07	3,63E-07	2,76E-07	1,87E-07	9,43E-08
280	20	4,83E-07	4,51E-07	3,65E-07	2,77E-07	1,87E-07	9,44E-08
300	20	4,85E-07	4,53E-07	3,66E-07	2,78E-07	1,88E-07	9,46E-08
5	30	-7,1E-08	1,73E-08	2,25E-08	2,29E-08	2,22E-08	1,96E-08
20	30	1,21E-07	1,42E-07	1,27E-07	1,15E-07	9,79E-08	6,2E-08
40	30	2,74E-07	2,58E-07	2,19E-07	1,85E-07	1,4E-07	7,41E-08
60	30	3,52E-07	3,26E-07	2,71E-07	2,19E-07	1,57E-07	7,8E-08
80	30	3,94E-07	3,67E-07	3,01E-07	2,38E-07	1,65E-07	7,99E-08
100	30	4,19E-07	3,92E-07	3,2E-07	2,49E-07	1,7E-07	8,1E-08
120	30	4,36E-07	4,09E-07	3,33E-07	2,56E-07	1,73E-07	8,17E-08
140	30	4,48E-07	4,22E-07	3,42E-07	2,61E-07	1,75E-07	8,22E-08
160	30	4,56E-07	4,31E-07	3,48E-07	2,65E-07	1,77E-07	8,26E-08
180	30	4,63E-07	4,38E-07	3,53E-07	2,68E-07	1,78E-07	8,29E-08
200	30	4,68E-07	4,43E-07	3,57E-07	2,7E-07	1,79E-07	8,31E-08
220	30	4,73E-07	4,48E-07	3,61E-07	2,72E-07	1,8E-07	8,33E-08
240	30	4,76E-07	4,51E-07	3,63E-07	2,73E-07	1,8E-07	8,35E-08
260	30	4,79E-07	4,55E-07	3,66E-07	2,75E-07	1,81E-07	8,36E-08
280	30	4,82E-07	4,57E-07	3,68E-07	2,76E-07	1,81E-07	8,37E-08
300	30	4,84E-07	4,59E-07	3,69E-07	2,77E-07	1,82E-07	8,38E-08

Tab. 15: Apparente Netto-CO₂-Austauschrate, Transpirationsrate und Wasserdampfleitfähigkeit von *Gerbera jamesonii* 'Moana' gemessen an vollentwickelten Blättern in Abhängigkeit von Lufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Wasserdampf-sättigungsdefizit der Luft bei einer CO₂-Konzentration der Luft von 6,36E-04 kg CO₂ m⁻³ und einer Einstrahlungsintensität von 110 W m⁻². sowie berechnete Werte (Gleichungen siehe Abb. 35 bis 40).

Lufttemperatur [°C]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	ALVP D [Pa /kPa]	apparente Netto-CO ₂ -Austauschrate [kg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹]	berechnete Netto-CO ₂ -Austauschrate [kg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹]	apparente Transpirationsrate [kg H ₂ O m ⁻² s ⁻¹]	berechnete Transpirationsrate [kg H ₂ O m ⁻² s ⁻¹]	Wasserdampfleitfähigkeit [kg H ₂ O m ⁻² s ⁻¹]	berechnete Wasserdampfleitfähigkeit [kg H ₂ O m ⁻² s ⁻¹]
9,6	18,8	13,94	8,89E-08	8,81E-08	7,02E-06	7,22E-06	5,00E-04	7,16E-04
9,5	19,0	13,85	9,77E-08	9,08E-08	7,38E-06	7,17E-06	5,29E-04	7,18E-04
9,5	19,3	13,66	1,07E-07	1,05E-07	7,74E-06	7,16E-06	5,67E-04	7,30E-04
9,6	19,5	13,41	1,19E-07	1,29E-07	8,28E-06	7,22E-06	6,21E-04	7,51E-04
9,7	19,9	13,38	1,32E-07	1,37E-07	9,00E-06	7,29E-06	6,73E-04	7,60E-04
9,9	23,5	12,78	2,16E-07	1,82E-07	1,19E-05	7,43E-06	9,36E-04	8,14E-04
10,0	24,5	12,55	2,33E-07	1,94E-07	1,33E-05	7,44E-06	1,05E-03	8,33E-04
10,1	83,5	5,30	3,51E-07	3,16E-07	6,30E-06	7,57E-06	1,19E-03	1,66E-03
10,1	83,9	5,14	3,49E-07	3,17E-07	7,56E-06	7,56E-06	1,46E-03	1,68E-03
10,1	84,1	4,93	3,45E-07	3,17E-07	8,64E-06	7,54E-06	1,74E-03	1,71E-03
10,1	60,5	6,87	3,18E-07	3,09E-07	4,68E-06	7,53E-06	6,68E-04	1,43E-03
10,1	84,3	4,87	3,44E-07	3,18E-07	9,54E-06	7,53E-06	1,96E-03	1,72E-03
10,0	84,3	4,65	3,39E-07	3,18E-07	1,01E-05	7,51E-06	2,19E-03	1,75E-03
10,1	73,8	5,64	3,25E-07	3,15E-07	6,66E-06	7,52E-06	1,19E-03	1,60E-03

10,0	83,5	4,79	3,31E-07	3,18E-07	1,12E-05	7,51E-06	2,31E-03	1,73E-03
10,0	83,2	4,82	3,31E-07	3,18E-07	1,12E-05	7,51E-06	2,33E-03	1,72E-03
10,0	82,9	4,86	3,32E-07	3,18E-07	1,13E-05	7,51E-06	2,34E-03	1,72E-03
10,0	82,5	4,88	3,31E-07	3,17E-07	1,15E-05	7,51E-06	2,36E-03	1,71E-03
10,0	82,1	4,89	3,31E-07	3,17E-07	1,15E-05	7,51E-06	2,36E-03	1,71E-03
10,0	76,8	5,37	3,26E-07	3,16E-07	7,74E-06	7,51E-06	1,43E-03	1,64E-03
10,0	78,3	5,20	3,27E-07	3,16E-07	8,10E-06	7,51E-06	1,55E-03	1,66E-03
10,0	79,4	5,10	3,28E-07	3,17E-07	8,28E-06	7,51E-06	1,61E-03	1,68E-03
10,0	20,7	12,89	1,55E-07	1,79E-07	1,04E-05	7,46E-06	8,03E-04	8,09E-04
10,0	21,4	12,78	1,68E-07	1,85E-07	1,12E-05	7,47E-06	8,78E-04	8,18E-04
10,0	22,2	12,62	1,83E-07	1,92E-07	1,21E-05	7,46E-06	9,63E-04	8,30E-04
10,0	23,0	12,43	1,98E-07	2,01E-07	1,31E-05	7,47E-06	1,06E-03	8,44E-04
10,0	23,9	12,27	2,13E-07	2,08E-07	1,42E-05	7,47E-06	1,16E-03	8,58E-04
20,0	78,0	5,27	3,22E-07	3,34E-07	7,02E-06	1,67E-05	1,34E-03	3,03E-03
20,0	81,4	4,77	3,20E-07	3,34E-07	1,06E-05	1,68E-05	2,21E-03	3,18E-03
20,2	83,8	4,34	3,23E-07	3,34E-07	1,48E-05	1,70E-05	3,41E-03	3,34E-03
20,2	84,1	4,29	3,26E-07	3,34E-07	1,51E-05	1,70E-05	3,52E-03	3,36E-03
20,2	84,3	4,22	3,28E-07	3,35E-07	1,55E-05	1,71E-05	3,66E-03	3,39E-03
20,3	84,5	4,18	3,30E-07	3,35E-07	1,58E-05	1,71E-05	3,78E-03	3,41E-03
20,3	84,7	4,10	3,31E-07	3,35E-07	1,60E-05	1,72E-05	3,93E-03	3,44E-03
20,3	85,6	3,88	3,39E-07	3,35E-07	1,71E-05	1,72E-05	4,41E-03	3,52E-03
20,4	85,7	3,82	3,40E-07	3,35E-07	1,73E-05	1,73E-05	4,53E-03	3,56E-03
20,4	85,9	3,80	3,40E-07	3,35E-07	1,75E-05	1,73E-05	4,58E-03	3,56E-03
20,4	86,0	3,81	3,41E-07	3,35E-07	1,76E-05	1,73E-05	4,61E-03	3,55E-03
20,3	86,0	3,81	3,42E-07	3,35E-07	1,78E-05	1,73E-05	4,67E-03	3,55E-03
20,4	86,5	3,60	3,46E-07	3,35E-07	1,82E-05	1,74E-05	5,05E-03	3,64E-03
20,4	86,6	3,57	3,46E-07	3,35E-07	1,84E-05	1,74E-05	5,14E-03	3,65E-03
20,4	86,7	3,57	3,46E-07	3,35E-07	1,84E-05	1,74E-05	5,16E-03	3,65E-03
20,4	86,7	3,56	3,47E-07	3,35E-07	1,85E-05	1,74E-05	5,20E-03	3,65E-03
20,4	86,8	3,55	3,48E-07	3,35E-07	1,87E-05	1,74E-05	5,25E-03	3,66E-03
20,5	87,2	3,39	3,52E-07	3,35E-07	1,93E-05	1,75E-05	5,65E-03	3,72E-03
19,7	56,6	9,35	3,33E-07	3,31E-07	1,28E-05	1,63E-05	1,37E-03	2,03E-03
19,9	70,4	6,80	3,20E-07	3,33E-07	2,02E-05	1,66E-05	2,95E-03	2,61E-03
19,9	70,3	6,80	3,19E-07	3,33E-07	2,11E-05	1,66E-05	3,10E-03	2,61E-03
19,9	70,4	6,76	3,20E-07	3,33E-07	2,12E-05	1,65E-05	3,13E-03	2,61E-03
19,7	70,6	6,63	3,27E-07	3,33E-07	2,14E-05	1,63E-05	3,22E-03	2,61E-03
19,6	70,6	6,60	3,27E-07	3,33E-07	2,14E-05	1,62E-05	3,25E-03	2,62E-03
19,6	70,6	6,59	3,28E-07	3,33E-07	2,16E-05	1,62E-05	3,28E-03	2,61E-03
19,5	70,7	6,56	3,28E-07	3,33E-07	2,16E-05	1,61E-05	3,29E-03	2,61E-03
19,5	70,7	6,55	3,29E-07	3,33E-07	2,18E-05	1,61E-05	3,31E-03	2,61E-03
19,8	61,1	8,68	3,31E-07	3,32E-07	1,58E-05	1,64E-05	1,83E-03	2,17E-03
19,4	70,6	6,50	3,34E-07	3,33E-07	2,21E-05	1,59E-05	3,41E-03	2,60E-03
19,4	70,6	6,52	3,34E-07	3,33E-07	2,23E-05	1,59E-05	3,41E-03	2,59E-03
19,3	70,6	6,48	3,35E-07	3,33E-07	2,23E-05	1,59E-05	3,45E-03	2,60E-03
19,3	70,5	6,48	3,36E-07	3,33E-07	2,25E-05	1,59E-05	3,47E-03	2,60E-03
19,3	70,5	6,48	3,36E-07	3,33E-07	2,27E-05	1,59E-05	3,50E-03	2,60E-03
19,7	65,4	7,89	3,34E-07	3,32E-07	2,21E-05	1,63E-05	2,81E-03	2,33E-03
19,7	65,9	7,75	3,34E-07	3,33E-07	2,25E-05	1,63E-05	2,90E-03	2,36E-03
19,6	66,5	7,60	3,35E-07	3,33E-07	2,29E-05	1,62E-05	3,00E-03	2,38E-03

19,3	70,1	6,59	3,42E-07	3,33E-07	2,32E-05	1,58E-05	3,52E-03	2,57E-03
19,6	67,0	7,45	3,36E-07	3,33E-07	2,30E-05	1,62E-05	3,09E-03	2,41E-03
19,3	69,9	6,63	3,41E-07	3,33E-07	2,34E-05	1,59E-05	3,51E-03	2,56E-03
19,3	69,7	6,69	3,42E-07	3,33E-07	2,34E-05	1,59E-05	3,48E-03	2,55E-03
19,4	69,4	6,76	3,42E-07	3,33E-07	2,34E-05	1,59E-05	3,46E-03	2,54E-03
19,6	67,4	7,30	3,36E-07	3,33E-07	2,32E-05	1,61E-05	3,19E-03	2,44E-03
19,4	69,2	6,82	3,42E-07	3,33E-07	2,34E-05	1,59E-05	3,43E-03	2,53E-03
19,6	34,7	13,46	3,35E-07	3,19E-07	1,62E-05	1,60E-05	1,20E-03	1,38E-03
19,4	16,2	19,19	1,39E-07	2,10E-07	1,44E-05	1,52E-05	7,51E-04	7,97E-04
19,5	17,4	18,78	1,66E-07	2,30E-07	1,62E-05	1,53E-05	8,66E-04	8,33E-04
20,0	77,3	5,89	3,05E-07	3,34E-07	5,40E-06	1,68E-05	9,22E-04	2,86E-03
20,0	83,6	4,76	2,99E-07	3,34E-07	7,20E-06	1,68E-05	1,50E-03	3,19E-03
20,0	85,1	4,54	2,97E-07	3,34E-07	8,46E-06	1,68E-05	1,86E-03	3,25E-03
20,0	85,9	4,36	2,97E-07	3,34E-07	9,18E-06	1,68E-05	2,09E-03	3,30E-03
20,0	86,3	4,26	2,98E-07	3,34E-07	9,72E-06	1,68E-05	2,30E-03	3,34E-03
20,0	88,0	3,83	3,07E-07	3,34E-07	1,42E-05	1,68E-05	3,72E-03	3,47E-03
20,0	88,1	3,73	3,08E-07	3,34E-07	1,44E-05	1,68E-05	3,87E-03	3,51E-03
20,0	88,3	3,74	3,08E-07	3,34E-07	1,44E-05	1,68E-05	3,87E-03	3,50E-03
20,0	88,5	3,72	3,08E-07	3,34E-07	1,46E-05	1,68E-05	3,92E-03	3,51E-03
20,1	86,7	6,77	2,74E-07	3,34E-07	1,30E-05	1,69E-05	1,91E-03	2,65E-03
20,0	37,0	13,03	3,03E-07	3,23E-07	9,18E-06	1,65E-05	6,98E-04	1,47E-03
20,0	62,5	8,32	3,02E-07	3,33E-07	1,22E-05	1,67E-05	1,47E-03	2,29E-03
20,0	70,9	7,13	2,99E-07	3,33E-07	2,18E-05	1,67E-05	3,07E-03	2,55E-03
20,0	70,9	7,16	2,99E-07	3,33E-07	2,21E-05	1,67E-05	3,09E-03	2,54E-03
20,0	71,0	7,17	3,00E-07	3,33E-07	2,25E-05	1,67E-05	3,13E-03	2,54E-03
20,0	71,0	7,14	3,01E-07	3,33E-07	2,27E-05	1,67E-05	3,18E-03	2,55E-03
20,0	71,1	7,07	3,01E-07	3,33E-07	2,29E-05	1,67E-05	3,24E-03	2,56E-03
20,0	66,6	7,66	3,02E-07	3,33E-07	1,60E-05	1,67E-05	2,09E-03	2,43E-03
20,0	68,2	7,35	3,02E-07	3,33E-07	1,71E-05	1,67E-05	2,34E-03	2,50E-03
20,0	71,6	6,86	3,04E-07	3,34E-07	2,50E-05	1,67E-05	3,64E-03	2,62E-03
20,0	71,8	6,78	3,05E-07	3,34E-07	2,56E-05	1,67E-05	3,77E-03	2,64E-03
20,0	72,0	6,69	3,06E-07	3,34E-07	2,61E-05	1,67E-05	3,90E-03	2,66E-03
20,0	72,1	6,63	3,07E-07	3,34E-07	2,65E-05	1,68E-05	3,99E-03	2,67E-03
20,0	71,3	6,72	3,00E-07	3,34E-07	2,68E-05	1,67E-05	4,00E-03	2,65E-03
20,0	72,2	6,56	3,07E-07	3,34E-07	2,70E-05	1,68E-05	4,11E-03	2,69E-03
20,0	71,7	6,60	3,01E-07	3,34E-07	2,72E-05	1,67E-05	4,13E-03	2,68E-03
20,0	71,8	6,52	3,02E-07	3,34E-07	2,75E-05	1,67E-05	4,23E-03	2,70E-03
20,0	72,0	6,50	3,03E-07	3,34E-07	2,79E-05	1,68E-05	4,28E-03	2,71E-03
20,0	72,2	6,48	3,04E-07	3,34E-07	2,79E-05	1,68E-05	4,31E-03	2,71E-03
20,0	91,6	3,76	3,56E-07	3,34E-07	7,74E-06	1,68E-05	2,06E-03	3,50E-03
20,0	91,8	3,70	3,59E-07	3,34E-07	8,10E-06	1,68E-05	2,17E-03	3,52E-03
20,0	92,1	3,62	3,62E-07	3,34E-07	8,28E-06	1,68E-05	2,31E-03	3,54E-03
20,0	92,3	3,58	3,65E-07	3,34E-07	8,64E-06	1,68E-05	2,40E-03	3,56E-03
20,0	92,6	3,55	3,67E-07	3,34E-07	8,64E-06	1,68E-05	2,45E-03	3,57E-03
20,0	93,4	3,44	3,68E-07	3,34E-07	9,18E-06	1,68E-05	2,66E-03	3,60E-03
20,0	93,3	3,44	3,69E-07	3,34E-07	9,18E-06	1,68E-05	2,68E-03	3,60E-03
20,0	93,2	3,41	3,64E-07	3,34E-07	9,18E-06	1,68E-05	2,69E-03	3,61E-03
20,0	93,3	3,39	3,63E-07	3,34E-07	9,18E-06	1,68E-05	2,71E-03	3,62E-03
20,0	93,4	3,42	3,68E-07	3,34E-07	9,18E-06	1,68E-05	2,71E-03	3,61E-03

20,0	93,2	3,46	3,70E-07	3,34E-07	9,36E-06	1,68E-05	2,69E-03	3,60E-03
20,0	93,3	3,44	3,70E-07	3,34E-07	9,36E-06	1,68E-05	2,70E-03	3,60E-03
20,0	93,3	3,38	3,64E-07	3,34E-07	9,36E-06	1,68E-05	2,76E-03	3,62E-03
20,0	93,2	3,47	3,65E-07	3,34E-07	9,36E-06	1,68E-05	2,70E-03	3,59E-03
20,0	66,8	8,71	2,71E-07	3,32E-07	6,66E-06	1,67E-05	7,65E-04	2,20E-03
20,0	67,8	8,32	2,91E-07	3,33E-07	8,46E-06	1,67E-05	1,02E-03	2,28E-03
20,0	68,7	8,05	3,08E-07	3,33E-07	1,01E-05	1,67E-05	1,26E-03	2,34E-03
20,0	69,4	7,87	3,23E-07	3,33E-07	1,15E-05	1,67E-05	1,47E-03	2,38E-03
20,0	69,9	7,74	3,33E-07	3,33E-07	1,26E-05	1,67E-05	1,63E-03	2,41E-03
20,0	71,2	7,52	3,44E-07	3,33E-07	1,42E-05	1,67E-05	1,90E-03	2,46E-03
20,0	71,0	7,48	3,46E-07	3,33E-07	1,42E-05	1,67E-05	1,90E-03	2,47E-03
20,0	71,3	7,48	3,42E-07	3,33E-07	1,42E-05	1,67E-05	1,91E-03	2,47E-03
20,0	71,1	7,47	3,45E-07	3,33E-07	1,42E-05	1,67E-05	1,92E-03	2,47E-03
20,0	71,4	7,48	3,42E-07	3,33E-07	1,44E-05	1,67E-05	1,92E-03	2,47E-03
20,0	71,9	7,50	3,45E-07	3,33E-07	1,48E-05	1,67E-05	1,96E-03	2,47E-03
20,0	72,0	7,48	3,45E-07	3,33E-07	1,48E-05	1,67E-05	1,97E-03	2,47E-03
20,0	72,1	7,49	3,45E-07	3,33E-07	1,49E-05	1,67E-05	1,99E-03	2,47E-03
20,0	72,3	7,54	3,47E-07	3,33E-07	1,49E-05	1,67E-05	1,98E-03	2,46E-03
20,0	72,3	7,54	3,46E-07	3,33E-07	1,51E-05	1,67E-05	2,00E-03	2,46E-03
20,0	87,6	4,42	3,22E-07	3,34E-07	7,38E-06	1,68E-05	1,67E-03	3,28E-03
20,0	87,9	4,30	3,25E-07	3,34E-07	7,92E-06	1,68E-05	1,83E-03	3,32E-03
20,0	88,1	4,18	3,26E-07	3,34E-07	8,28E-06	1,68E-05	1,96E-03	3,36E-03
20,0	88,3	4,13	3,28E-07	3,34E-07	8,46E-06	1,68E-05	2,04E-03	3,37E-03
20,0	88,4	4,13	3,29E-07	3,34E-07	8,82E-06	1,68E-05	2,14E-03	3,37E-03
20,0	88,6	4,09	3,28E-07	3,34E-07	9,36E-06	1,68E-05	2,28E-03	3,39E-03
20,0	64,4	8,85	3,34E-07	3,32E-07	3,60E-06	1,67E-05	4,01E-04	2,17E-03
20,0	71,6	7,45	3,40E-07	3,33E-07	1,28E-05	1,67E-05	1,71E-03	2,47E-03
20,0	69,4	8,20	3,12E-07	3,33E-07	1,40E-05	1,67E-05	1,72E-03	2,31E-03
20,0	69,9	8,07	3,17E-07	3,33E-07	1,48E-05	1,67E-05	1,84E-03	2,33E-03
20,0	70,4	7,94	3,23E-07	3,33E-07	1,57E-05	1,67E-05	1,97E-03	2,36E-03
20,0	70,8	7,83	3,29E-07	3,33E-07	1,64E-05	1,67E-05	2,10E-03	2,39E-03
20,0	71,2	7,67	3,35E-07	3,33E-07	1,71E-05	1,67E-05	2,24E-03	2,42E-03
20,0	71,1	7,59	3,37E-07	3,33E-07	1,75E-05	1,67E-05	2,30E-03	2,44E-03
20,0	71,2	7,50	3,40E-07	3,33E-07	1,78E-05	1,67E-05	2,37E-03	2,46E-03
20,0	71,4	7,47	3,42E-07	3,33E-07	1,80E-05	1,67E-05	2,42E-03	2,47E-03
20,0	71,5	7,45	3,44E-07	3,33E-07	1,82E-05	1,67E-05	2,44E-03	2,48E-03
20,0	18,1	17,58	3,56E-07	2,74E-07	1,53E-05	1,60E-05	8,75E-04	9,58E-04
30,0	52,9	13,69	3,43E-07	3,43E-07	2,75E-05	3,32E-05	2,01E-03	2,53E-03
30,0	61,7	9,37	3,94E-07	3,44E-07	4,07E-05	3,55E-05	4,35E-03	3,80E-03
30,0	61,7	9,42	3,91E-07	3,44E-07	4,10E-05	3,55E-05	4,36E-03	3,78E-03
30,0	52,4	10,52	3,41E-07	3,44E-07	2,86E-05	3,51E-05	2,72E-03	3,41E-03
30,0	53,9	10,04	3,30E-07	3,44E-07	2,99E-05	3,53E-05	2,97E-03	3,57E-03
30,0	54,8	9,65	3,30E-07	3,44E-07	3,06E-05	3,55E-05	3,18E-03	3,70E-03
30,0	17,6	25,18	3,18E-07	2,73E-07	1,40E-05	1,21E-05	5,58E-04	8,66E-04
30,0	55,8	8,96	3,42E-07	3,44E-07	3,29E-05	3,57E-05	3,68E-03	3,95E-03
30,0	57,9	8,38	3,41E-07	3,44E-07	3,62E-05	3,59E-05	4,32E-03	4,17E-03
30,0	57,8	8,48	3,41E-07	3,44E-07	3,64E-05	3,59E-05	4,29E-03	4,13E-03
30,0	35,7	18,57	2,86E-07	3,38E-07	2,16E-05	2,83E-05	1,16E-03	1,61E-03
30,0	57,8	8,37	3,46E-07	3,44E-07	3,76E-05	3,59E-05	4,49E-03	4,17E-03

30,0	45,9	12,81	3,59E-07	3,43E-07	3,20E-05	3,39E-05	2,50E-03	2,75E-03
30,0	38,3	17,74	2,75E-07	3,39E-07	2,34E-05	2,94E-05	1,32E-03	1,74E-03
30,0	58,1	8,17	3,56E-07	3,44E-07	3,94E-05	3,60E-05	4,82E-03	4,25E-03
30,0	41,3	22,09	2,59E-07	3,21E-07	1,48E-05	2,16E-05	6,68E-04	1,15E-03
30,0	26,4	25,94	3,09E-07	2,51E-07	1,26E-05	9,06E-06	4,88E-04	8,06E-04
29,9	43,5	21,21	2,62E-07	3,27E-07	1,80E-05	2,36E-05	8,46E-04	1,25E-03
30,0	56,4	11,65	3,42E-07	3,44E-07	3,33E-05	3,45E-05	2,85E-03	3,07E-03
30,0	56,1	11,09	3,56E-07	3,44E-07	3,37E-05	3,47E-05	3,03E-03	3,22E-03
30,0	56,9	11,34	3,58E-07	3,44E-07	3,47E-05	3,47E-05	3,07E-03	3,16E-03
30,0	56,1	9,41	3,71E-07	3,44E-07	3,49E-05	3,54E-05	3,72E-03	3,77E-03
30,0	57,0	11,47	3,57E-07	3,44E-07	3,58E-05	3,47E-05	3,12E-03	3,12E-03
30,0	56,4	9,48	3,77E-07	3,44E-07	3,58E-05	3,54E-05	3,78E-03	3,75E-03
30,0	56,7	10,17	3,76E-07	3,44E-07	3,62E-05	3,52E-05	3,56E-03	3,52E-03
30,0	56,8	9,66	3,83E-07	3,44E-07	3,69E-05	3,53E-05	3,81E-03	3,69E-03
30,0	57,1	11,29	3,73E-07	3,44E-07	3,82E-05	3,48E-05	3,37E-03	3,18E-03
30,0	56,9	11,18	3,74E-07	3,44E-07	3,83E-05	3,48E-05	3,43E-03	3,21E-03
29,9	57,6	10,63	3,80E-07	3,44E-07	3,80E-05	3,49E-05	3,58E-03	3,36E-03
30,0	46,6	18,56	3,20E-07	3,37E-07	2,68E-05	2,82E-05	1,44E-03	1,60E-03
30,0	46,7	17,42	3,08E-07	3,40E-07	3,37E-05	2,97E-05	1,93E-03	1,78E-03
30,0	46,3	16,55	3,13E-07	3,41E-07	3,44E-05	3,08E-05	2,08E-03	1,94E-03
30,0	47,1	16,98	3,19E-07	3,40E-07	3,49E-05	3,03E-05	2,05E-03	1,86E-03
30,0	58,6	10,42	3,99E-07	3,44E-07	4,05E-05	3,52E-05	3,89E-03	3,45E-03
30,0	57,6	10,79	3,92E-07	3,44E-07	4,09E-05	3,49E-05	3,79E-03	3,32E-03
30,0	57,8	10,52	3,99E-07	3,44E-07	4,10E-05	3,51E-05	3,89E-03	3,41E-03
30,0	45,9	15,54	3,29E-07	3,42E-07	3,47E-05	3,18E-05	2,23E-03	2,14E-03

Anhang E - Diagramme der partiellen Blattflächenindices

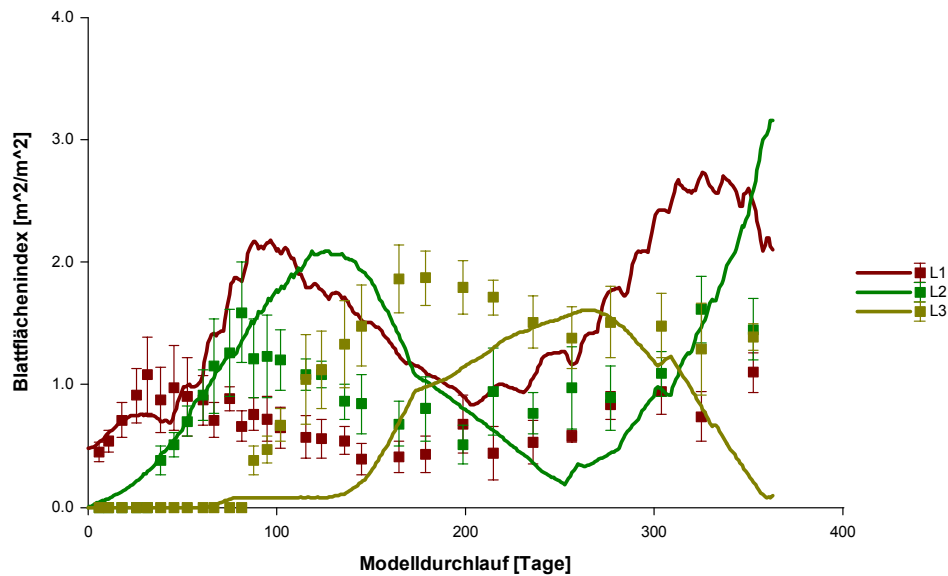


Abb. 92: Beobachtete (Messpunkte mit Standardfehlern) und berechnete Modelldaten für die Statusvariablen L1 ($B < 0,10$), L2 ($B = < 0,10$) und L3 ($B = 0,33$) nach einem Modelldurchlauf unter den Klima- und Wachstumsbedingungen des Prüfgliedes mit über den Tag hinweg degressiv abnehmender Bewässerungsintensität.

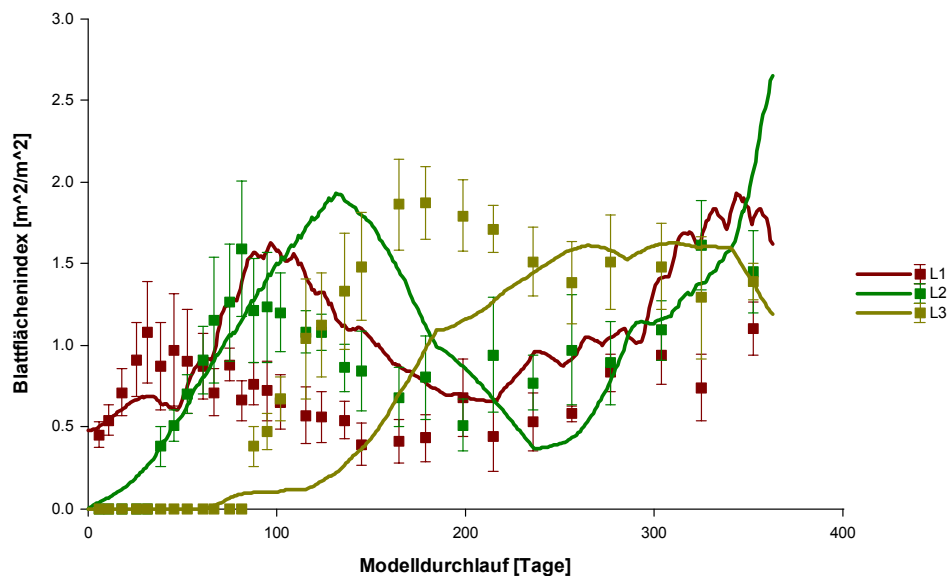


Abb. 93: Beobachtete (Messpunkte mit Standardfehlern) und nach einer Optimierung der Koeffizienten p_{bz1} , p_{bz2} und f_{TG} berechnete Modelldaten für die Statusvariablen L1 ($B < 0,10$), L2 ($B = 0,18$) und L3 ($B = 0,50$) nach einem Modelldurchlauf unter den Klima- und Wachstumsbedingungen des Prüfgliedes mit über den Tag hinweg degressiv abnehmender Bewässerungsintensität.

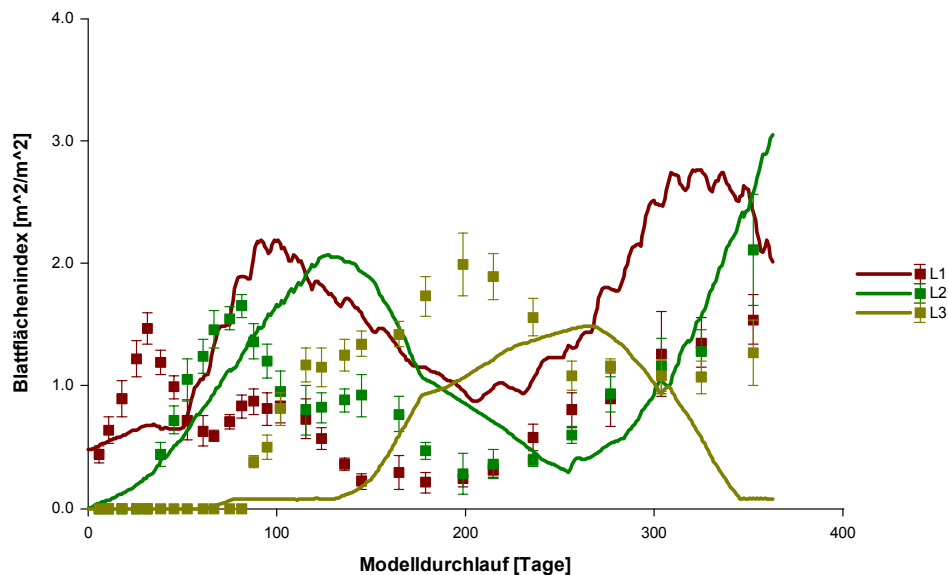


Abb. 94: Beobachtete (Messpunkte mit Standardfehlern) und berechnete Modelldaten für die Statusvariablen L1 ($B < 0,10$), L2 ($B < 0,10$) und L3 ($B = 0,23$) nach einem Modelldurchlauf unter den Klima- und Wachstumsbedingungen des Bewässerungsprüfgliedes mit bedarfsgerechter Tensiometersteuerung ohne Überschussbewässerung.

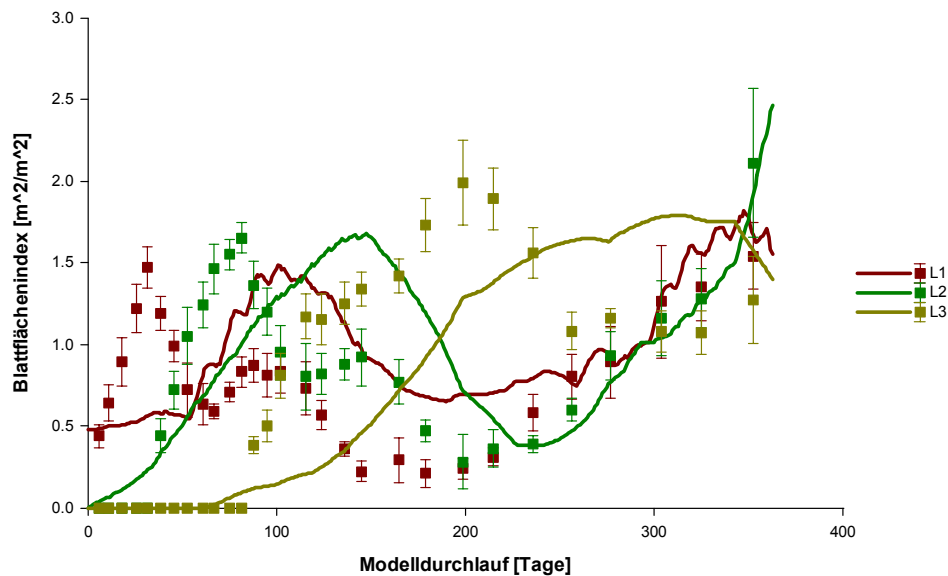


Abb. 95: Beobachtete (Messpunkte mit Standardfehlern) und nach einer Optimierung der Koeffizienten p_{bz1} , p_{bz2} und f_{TG} berechnete Modelldaten für die Statusvariablen L1 ($B < 0,10$), L2 ($B = 0,37$) und L3 ($B = 0,44$) nach einem Modelldurchlauf unter den Klima- und Wachstumsbedingungen des Bewässerungsprüfgliedes mit bedarfsgerechter Tensiometersteuerung ohne Überschussbewässerung.

Anhang F - Erläuterungen zu den ModelMaker-Diagrammen



Abb. 96: **Statusvariable:** Variable, die den Zustand eines Modellteils beschreibt. Von einer Statusvariable können Massenflüsse ausgehen, sie kann aber auch welche erhalten. Die Berechnung des aktuellen Wertes erfolgt über Differentialgleichungen.



Abb. 97: **Massenfluss:** Er stellt den Transport einer Masse oder Menge von einer Statusvariablen zur anderen dar.



Abb. 98: **Einflusspfeil:** Er stellt den Einfluss eines Wertes eines Modellteils auf einen anderen dar. Dabei können Werte oder Informationen übergeben werden, die in weiteren Berechnungen benötigt werden. Es findet kein Transport von Massen oder Mengen statt



Abb. 99: **Variable:** In einer Variablen werden Werte berechnet oder dem Modell zur Verfügung gestellt und über Einflusspfeile an andere Modellteile weitergegeben. Sie werden kontinuierlich während des Modelldurchlaufes aktualisiert.



Abb. 100: **Definierte Variablen:** im Gegensatz zu Variablen werden diese nur aufgrund einer Aufforderung durch Ereignismodule berechnet. Ihr Wert bleibt bis zu einer neuen Berechnung konstant. Sie können auch als Speichervariablen benutzt werden.

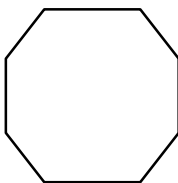


Abb. 101: **Ereignismodule:** In ihnen finden Berechnungen statt, deren Ergebnisse den Wert von definierten Variablen bestimmen. Sie können bei den Berechnungen auf Werte von Variablen jeglicher Art zurückgreifen. Die Berechnungen werden in Abhängigkeit des zeitlichen Ablaufes durchgeführt oder können durch definierte Ereignisse im Modellablauf initiiert werden.

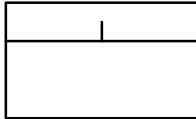


Abb. 102: **Datentabelle:** Hinter diesem Modellsymbol verbirgt sich eine Datentabelle auf welche Modellvariablen über Einflusspfeile zugreifen können, um entsprechende Werte in Abhängigkeit der Zeit als Steuervariable anzunehmen.



Abb. 103: **Untermodell:** Hinter diesem Symbol verbirgt sich der Zugang zu einem Untermodell, in dem Werte berechnet werden, die für die Berechnungen im Hauptmodell benötigt werden. Ein Datenaustausch zwischen übergeordnetem und Untermodell ist über die Schnittstellen möglich.

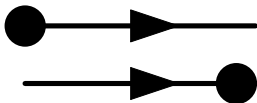


Abb. 104: **Schnittstelle:** Die Pfeile stellen die Übergabe von Werten von Variablen an Untermodelle bzw. umgekehrt vom Untermodell an übergeordnete Modellteile dar.

Erklärung zur Dissertation

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel und Literatur angefertigt habe.

Havixbeck, den 18.06.2001,

Danksagung

Schließlich möchte ich allen Leuten danken, die mich bei der Durchführung des Projektes unterstützt haben. Besonderer Dank gilt dabei Prof. Dr. Jürgen Matschke, der es möglich gemacht hat, dass diese Promotion am Gartenbauzentrum Westfalen-Lippe durchgeführt werden konnte und mir immer mit Rat und Hilfe zur Seite stand.

Letztendlich möchte ich Claudia, meiner Frau, für ihre Liebe und Unterstützung danken, die mir die Kraft gab, die Promotion erfolgreich abzuschließen.